

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta Strojní

Ústav letecké dopravy

Nové materiály pro stavbu letounů třetího tisíciletí

New Materials for Aircraft Construction of Third Millennium

Student:

Robert Mareček

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. David Schwarz

Ostrava 2012

Zadání bakalářské práce

Student:

Robert Mareček

Studijní program:

B3712 Technologie letecké dopravy

Studijní obor:

3708R036 Technologie letecké dopravy

Téma:

Nové materiály pro stavbu letounů třetího tisíciletí
New Materials for Aircraft Construction of Third Millennium

Zásady pro vypracování:

Analýzujte důvody, pro které se ustupuje od materiálů používaných na výrobu letadel v minulém století. Proveďte průzkum materiálů, s kterými konstruktéři letadel počítají při zavádění nových letadel do výroby. Porovnejte odlišnosti obou materiálových skupin a vyjádřete, jaké požadavky budou muset splňovat materiály pro výrobu nových letadel, Které materiály pro výrobu nových letadel hodlá upřednostnit student a proč.

Seznam doporučené odborné literatury:

Aircraft Maintenance Manual pro Boeing 737 NG, Boeing 737 CL, Airbus A320, SAAB 340
Component Maintenance Manual 32-00 00

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Schwarz**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

doc. Ing. Vladimír Smrž, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě -----

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

.....

podpis

Robert Mareček

Prostřední 1141/13

736 01, Havířov - Bludovice

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidu Schwarzovi, profesoru Ing. Rudolfu Volnerovi, CSc., Josefu Hranickému a Ing. Rostislavu Horeckému za poskytnuté materiály a rady, které mi velice pomohly k vypracování této bakalářské práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MAREČEK, R. *Nové materiály pro stavbu letounů třetího tisíciletí: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut letecké dopravy, 2012, 67 s.

Vedoucí práce: Ing. Schwarz. D.

Bakalářská práce se zabývá novými materiály pro stavbu letounů třetího tisíciletí. V úvodní části jsou popsány vlastnosti konstrukčních materiálů a jejich charakteristiky, konstrukční materiály, které se používají v současnosti a nakonec materiály třetího tisíciletí. Hlavní část této práce jsou nové materiály třetího tisíciletí, které se zavádějí do výroby moderních letadel.

Klíčová slova: letecký průmysl, konstrukční materiály, kovy, nekovy, přírodní materiály, elektron, kompozita, plasty, kevlar, letadlo budoucnosti.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MAREČEK, R. *New Materials for Aircraft Construction of Third Millennium: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport – Department of Air Transport, 2012, 67 p.

Thesis head: Ing Schwarz, D.

The aim of this thesis is to focus on the new materials being used in order construct the third millennium aircraft. Besides, the introduction of this paper will focus on the characteristics of the construction materials. Moreover, the study will contend with the current materials being used within the aviation industry as well as the materials of the third millennium. Consequently, the main focus of this work is to introduce the new materials of the third millennium, which are being used for the construction of modern aircraft.

Keywords: air industry, construction materials, metals, non-metals, natural materials, electron, composite, plastics, kevlar, future aircraft.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	7
Úvod	9
Cíl práce	10
1 Historie konstrukčních materiálů používaných v leteckém průmyslu	11
2 Vlastnosti konstrukčních materiálů a charakteristika.....	14
2.1 Chemické vlastnosti.....	14
2.1.1 Koroze	14
2.1.2 Žáruvzdornost.....	17
2.2 Mechanické vlastnosti	17
2.2.1 Houževnatost.....	17
2.2.2 Pružnost.....	18
2.2.3 Tvrdost	18
2.2.4 Pevnost	24
2.3 Fyzikální vlastnosti.....	25
2.3.1 Hustota	25
2.3.2 Bod tání a tuhnutí	25
2.3.3 Tepelná vodivost	26
2.3.4 Elektrická vodivost.....	26
2.3.5 Permeabilita.....	27
3 Konstrukční materiály používané v současnosti.....	29
3.1 Kovy	29

3.1.1	Zpracování kovů.....	31
3.2	Nekovy	33
3.3	Přírodní materiály	37
4	Materiály třetího tisíciletí.....	39
4.1	Slitiny hořčíku – elektron	39
4.2	Kompozita	42
4.2.1	Dělení kompozitních materiálů podle tvaru výztuže.....	43
4.2.2	Dělení kompozitních materiálů podle typu vláken	44
4.3	Plasty (umělé hmoty).....	50
4.4	Kevlar	51
4.5	Ostatní nové materiály používané v leteckém průmyslu.....	53
4.6	Požadavky na nové letecké materiály.....	56
5	Letadlo blízké budoucnosti	57
	Zhodnocení cíle.....	58
	Závěr	59
	Seznam použité literatury	60
	Seznam obrázků	63
	Seznam tabulek	66
	Seznam grafů.....	67

Seznam použitých značek a symbolů

μm	jednotka délky – mikrometr
mm	jednotka délky – milimetr
m	jednotka délky metr
kg	jednotka hmotnosti kilogram
km/h	jednotka rychlosti – kilometr za hodinu
$^{\circ}\text{C}$	jednotka teploty – Celsiův stupeň
MPa	jednotka tlaku – megapascal
V	symbol objemu
m	symbol hmotnosti
λ	symbol tepelné vodivosti
Q	množství tepla
J	jednotka práce a energie
S	jednotka elektrické vodivosti (Siemens)
Ω	jednotka elektrického odporu (omega)
HV	označení tvrdosti podle Vickerse
HB	označení tvrdosti podle Brinella
r. v.	relativní vlhkost
C	prvek uhlík
Cs	prvek cesium
Cr	prvek chrom

Sn	prvek cín
Al	prvek hliník
Pb	prvek olovo
Cu	prvek měď
Au	prvek zlato
Ag	prvek stříbro
Fe	prvek železo
Ti	prvek titan
Ni	prvek nikl
Mg	prvek hořčík
Zn	prvek zinek
Mn	prvek mangan

Úvod

Letecký průmysl je čím dál náročnější na výrobu letadel, a má stále vyšší požadavky na konstrukční prvky všech mechanismů. Na výrobce dopravních letadel je v současnosti vyvíjen obrovský tlak na kvalitnější, komfortnější a lehčí výrobní materiály. Jsou ekonomicky a ekologicky šetrnější, a nezatěžují tak životní prostředí. V dřívějších dobách tomu bylo jinak. Nejprve se letouny konstruovaly z materiálů, jako je například dřevo a tkaniny, které byly uplatněny při výrobě prvních letadel. Později začali konstruktéři hojně využívat kov, především hliníkové slitiny, které byly odolnější než dřevo.

Požadavky na výrobní postupy a technologie vzrůstají úměrně s nároky leteckých společností, které chtějí co nejvíce ušetřit na provozu. Proto se letadla konstruují z maximálně odlehčených materiálů. Začaly se zavádět technologie využívající plastické hmoty a kompozity, které postupně nahrazují těžké slitiny kovů a činí tak letadlo lehčí. [1].

Rád bych Vás tedy seznámil s novodobými druhy a vlastnostmi konstrukčních materiálů a jejich využitím.

Cíl práce

Cílem mé práce je analyzovat důvody, pro které se ustupuje od materiálů používaných v minulém století. Popsat fyzické, chemické a mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů. Porovnat odlišnosti původních a nových materiálů, které se používají při výrobě letadel. Moji práci rozdělím do dvou hlavních částí. První část představují konstrukční materiály, které se používají v současnosti, a druhá část bude o materiálech třetího tisíciletí. Posledním cílem bude rozhodnout, jaké materiály upřednostním pro výrobu nových letadel.

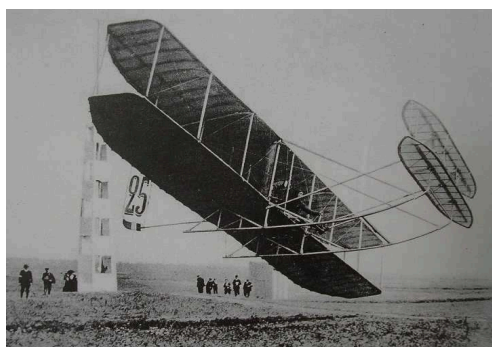
1 Historie konstrukčních materiálů používaných v leteckém průmyslu

První skutečné letadlo, které bylo plně kontrolovatelné a poháněné motorem, vzniklo 17. prosince 1903. Zkonstruovali ho bratři Wrightové, kteří tímto letounem změnili možnosti člověka. Toto letadlo, které se jmenovalo *Flyer*, bylo vyrobeno ze dřeva, látky a vyztuženo dráty. Přesto konstrukce dosáhla potřebné pevnosti a rovnováhy mezi lehkostí. Vlastnilo dvě tlačné vrtule, které byly poháněny dvanáctikolovým spalovacím motorem.

Svůj letoun zkonstruovali bratři Wrightové v městě Daytonu v Ohio, kde vlastnili obchod s bicykly. Orville Wright při prvním pokusu letěl 12 sekund do vzdálenosti 37 metrů, ovšem tentýž den uletěl jeho bratr Wilbur stejným letounem v té době neuvěřitelnou vzdálenost 260 a let trval 59 sekund.[3].



Obr. 1.1 Wilbur Wrigh



Obr. 1.2 Dvouplošník Flyer



Obr. 1.3 Orville Wright

Již mnoho technologických postupů se vystřídal v průběhu celé historie letadlové techniky. Tyto technologie jsou od samého vzniku stále vylepšovány rozvíjejícími se modernizovanými postupy. Provozní technologičnost rozhoduje o kvalitě provozu dané letadlové techniky.

Dřevo patřilo k základnímu materiálu při konstrukci draku letadla spolu s tkaninami. V pozdější době, se začaly dřevěné konstrukce kombinovat s ocelovými trubkami. V poválečné době začal prudký rozvoj v letectví, a také vyšší nároky na konstrukci letadel. Do popředí se dostávaly kovové materiály, především slitiny hliníku a hořčíku, které nahradily tradiční materiály a používají se dodnes. V roce 1915 vzlétl první celokovový *středoplošník J1-Blechesel*, který zkonstruoval *Hugo Junkers*. Toto letadlo bylo postaveno z bodově svařovaného profilovaného ocelového plechu. Tento letoun byl rychlejší než všechny ostatní stíhací letouny té doby. Dosahoval rychlosti 170 km/h.



Obr. 1.4 Hugo Junkers



Obr. 1.5 Středoplošník J1 – Blechesel

Později se kvůli vysokému aerodynamickému ohřevu muselo přejít na slitiny titanu a speciální oceli. V současné době se konstruktéři zaměřují na co nejlehčí materiály, které snižují hmotnost letounu. Je to způsobené vysokou ekonomickou zátěží na letecké společnosti vzhledem k provozu letadla. Začaly se vyvíjet netradiční umělé materiály například kompozity či plastické hmoty.[4].

2 Vlastnosti konstrukčních materiálů a charakteristika

2.1 Chemické vlastnosti

Po ověření dobrých leteckých vlastností nejvíce zkoumáme tyto charakteristiky:

2.1.1 Koroze

Koroze je samovolné znehodnocení materiálů, jak kovových tak nekovových, způsobené chemickou nebo elektrochemickou reakcí s okolním prostředím. Na letadlech probíhá koroze například v atmosféře nebo jiných plynech, ve vodě apod. Díky korozi ztrácí materiál svou hmotnost v důsledku postupného ubývání materiálů na své ploše. Tento jev způsobí na povrchu kovu heterogenní reakci, při níž kov přechází v okysličený stav. Okysličením je stav či reakce, při které materiál přichází o elektrony. Abychom předešli korozi, musí se materiál ošetřovat různými přípravky. V letectví je ošetřování různých částí na letadle velice důležitá a věnuje se jí značná pozornost. Velká část kovů či slitin je nestálá a samovolně přechází do okysličeného stavu. Chrom je podstatně odolnější než železo, protože má lepší ochranné vlastnosti na svém povrchu.

Rozdělení koroze dle vnitřního mechanismu

Chemická koroze

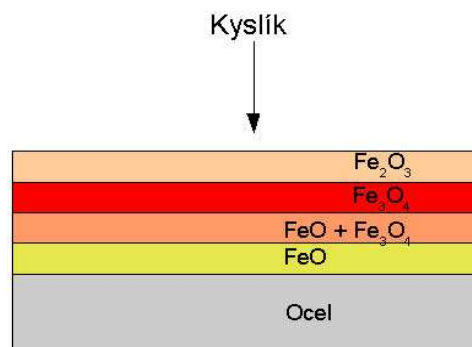
Oxidace kovů a slitin je nejrozšířenější chemickou reakcí. Specifickým rysem této korozní reakce je vznik korozních zplodin v místech, kde k reakci došlo. Pokud jsou reakční produkty kapalné či plynné, tak při různých teplotách probíhá koroze stejnou rychlostí. Tento průběh lze vyjádřit vztahem:

$$[m=k_t \cdot t]$$

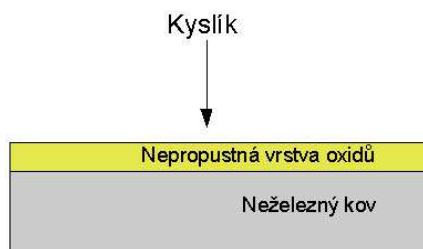
m - korozní změna [mm/rok],

k_t - konstanta závislá na teplotě,

t - čas.



Obr. 2.1 Tvorba oxidů při korozi oceli



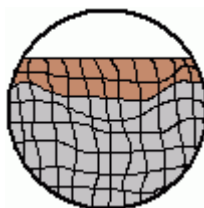
Obr. 2.2 Tvorba oxidů při korozi neželezných kovů

Elektrochemická koroze

U této koroze se reakční energie vybavuje ve formě elektrického proudu. Elektrochemická koroze je souhrn dvou reakcí. První je anodová, při níž vznikají ionty nebo oxidy, a odpovídá oxidaci kovu. Druhá je katodová, která odpovídá redukci některé složky obsažené v elektrolytu. Při anodové reakci se uvolňují elektrony, které se pohybují v kovu a zúčastňují se katodové reakce. Ta má depolarizující charakter, kdy dojde k redukci kyslíku či k vybití iontů vodíku rozpuštěného v elektrolytu. Do pasivního stavu se kov dostane tehdy, pokud korozní zplodiny vytvářejí na povrchu kovu ochrannou vrstvu, v které je rychlost koroze velmi malá.[5].

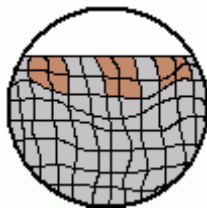
Rozdělení koroze podle druhu korozního prostředí

„Rovnoměrnou korozi se rozumí rovnoměrné napadání se stejnou korozní rychlostí na celém povrchu, který je ve styku s korozním prostředím. Postup rovnoměrné koroze je velmi snadno kontrolovatelný a předvídatelný“. [6].



Obr. 2.3 Rovnoměrná koroze

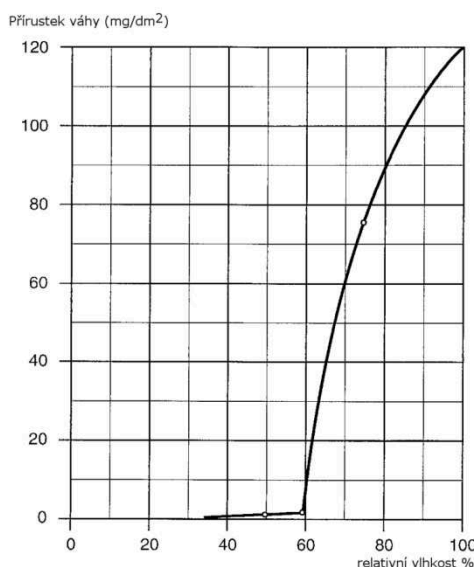
„Nerovnoměrná koroze. Vzniknou-li v korozním systému heterogenity a to buď na straně prostředí nebo na straně materiálu, může koroze probíhat nerovnoměrně. Na rozdíl od rovnoměrného napadení se výskyt nerovnoměrných forem koroze hůře předpovídá a k selhání výrobku dochází v kratší době“. [7].



Obr. 2.4 Nerovnoměrná koroze

Atmosférická koroze

Drtivá většina kovových částí se vyskytuje v atmosféře, kde podléhají atmosférické korozi. Materiály jsou napadány korozi v dostatečně vlhkých atmosférických podmínkách. Díky těmto vlivům vznikne asi 5-150 μm tenká vrstva elektrolytu na povrchu kovu. V této vrstvě se mohou rozpustit plynné nečistoty (chlor, sirovodík, chlorovodík či oxid siřičitý), které se nacházejí v atmosféře či tuhé polétavé částice prachu nebo soli. [8].



Obr. 2.5 Rychlost koroze u oceli

Diagram ukazuje:

Při 0-35 % r. v. – absolutně žádná koroze

Při 36-60 % r. v. – nepatrně stoupající, ale prakticky bezvýznamná koroze

Přes 60 % r. v. – prudce stoupající vlhkost koroze

Kód	Název	Vysvětlení
C1	Velmi nízká	Atmosféry v uzavřených místnostech, ve kterých nedochází ke kondenzaci vody
C2	Nízká	Prostory, kde občas dochází ke kondenzaci vody
C3	Střední	Suché klimaty
C4	Vysoká	Vlhké oblasti za působení atmosférických nečistot průmyslových měst, přístavů
C5	Velmi vysoká	

Tab. 2.1 Rozdělení atmosféry podle korozní agresivity podle normy ISO 9223

2.1.2 Žáruvzdornost

Žáruvzdornost je další chemická vlastnost, která je velmi důležitá u leteckých materiálů. Je to vlastnost odolávat velkým teplotám okolo 600 °C. Žáruvzdorné materiály používáme tam, kde nejde o přenos významných namáhání. Materiály jsou vyrobeny ze slitin železa s křemíkem, hliníkem nebo keramikou. [1].

Žáropevné materiály jsou dlouhodobě pevné i při vysokých teplotách. Tyto kovové slitiny se v letadlových konstrukcích používají v místech, kde dochází k velkému namáhání částí letadlových motorů. [1].

2.2 Mechanické vlastnosti

Mezi mechanické vlastnosti materiálu patří schopnost odolávat proti působení vnějších zatížení, a následné reakci materiálů. Mezi ně patří houževnatost, křehkost, pružnost, tvrdost a pevnost.

2.2.1 Houževnatost

Houževnatost je schopnost materiálů zůstat během ohýbání či působení velkých napětí bez porušení. Materiály, které mají v krystalové mřížce tzv. dislokaci, mezi něž patří například plasty, jsou zatíženy nadbytečnou tvárností, kterou lze zmírnit prostřednictvím legování. Hlavní charakteristika houževnatých materiálů je schopnost absorbovat nárazy, ovšem na druhou stranu mají menší pevnosti v tahu. Opačným příkladem jsou křehké

materiály, které nemají žádnou dislokaci. Vlastní tedy ideální krystalovou mřížku. Nevýhodou je malá odolnost při plastických deformacích.[9].

2.2.2 Pružnost

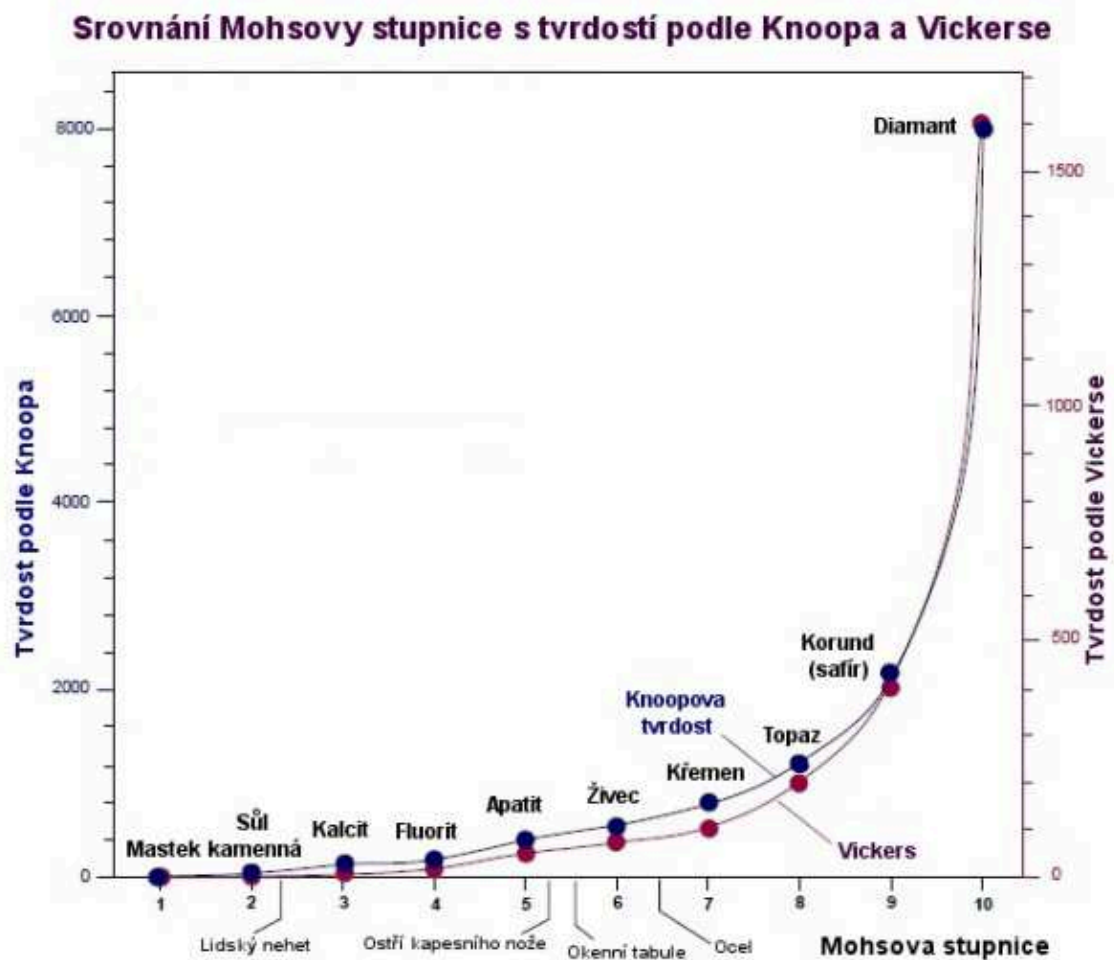
Pružnost neboli elasticita je děj, kdy se těleso působením sil deformuje, ovšem když se tato síla odstraní, těleso se vrátí do původní polohy. V případě, že se těleso nevrátí do původní polohy, je nepružná neboli plastická.[1].

2.2.3 Tvrdost

Tvrdost je vlastnost materiálu odolávat proti vniknutí jiného tělesa do povrchu. Jedna z nejstarších zkoušek tvrdosti je takzvaná „vrypová zkouška“, která se používá nejčastěji v mineralogii. Využívá se pro určení tvrdosti nerostů. Vrypová zkouška se provádí pokusným vrypem nerosty. Má celkem deset stupňů. Nejnižší číslo představuje nejměkčí nerost (mstek) a nejvyšší číslo představuje nejtvrdší nerost (diamant).[1].

Tvrdost	Látka	Chemický název	Chemický vzorec
1	mstek	kyselý metakřemičitan hořečnatý	$\text{H}_2\text{Mg}_3(\text{SiO}_3)_4$
2	sůl kamenná	chlorid sodný	NaCl
3	kalcit (vápenec)	uhličitan vápenatý	CaCO_3
4	fluorit (kazivec)	fluorid vápenatý	CaF_2
5	apatit		$\text{Ca}(\text{PO}_4)_3$
6	živec (ortoklas)	křemičitan hlinitodraselný	KAlSi_3O_8
7	křemen	oxid křemičitý	SiO_2
8	topaz		Al_2SiO_4
9	korund	oxid hlinitý	Al_2O_3
10	diamant	uhlík	C

Tab. 2.2 Mohsova stupnice tvrdosti



Obr. 2.6 Nelinearita Mohsovy stupnice tvrdosti

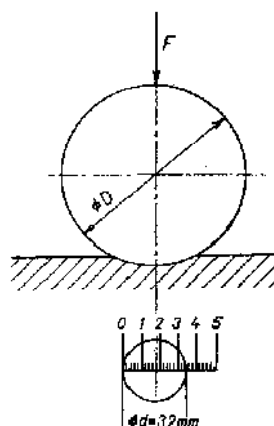
Pro názornost uvedu pár příkladů. Cs je prvek periodické soustavy, který má nejmenší tvrdost podle Mohse 0,2. Nejtvrdší prvek je C ve formě diamantu a ten má číslo 10 podle Mohse. Nejtvrdším kovem je Cr 8,5 a nejtvrdší sloučeninou je kubický nitrid boru. [10].

U technických materiálů se používají metody tvrdosti podle Brinella, Rockwella a Vickerse.

Brinellova zkouška tvrdosti

„Podstatou Brinellovy zkoušky je zatlačování ocelové kalené kuličky průměru D do vyleštěné plochy zkoušeného kovu konstantním zatížením.

Tvrdost je pak vyjádřena vztahem: $[HB=F/S]$ “[11].



Obr. 2.7 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Brinellova zkouška tvrdosti se používá při porovnávání tvrdosti neželezných kovů například (Sn, Al, Pb či Cu a jejich slitin), šedé litiny či měkké oceli. Abychom mohli tuto zkoušku provést, musíme nejdříve změřit, buď hloubku měřeného předmětu, nebo průměr. Průměr můžeme změřit velice přesně pomocí tzv. *Brinellovy lupy*, která měří na setiny milimetru. Ovšem hloubka vtisku se měří velice nepřesně a obtížně, protože vtisk bývá nezřetelný.

„Tvrdost zjišťujeme vtlačováním kalené ocelové kuličky o průměru $D=10, 5, 2,5, 1$ mm rovnoměrně stupňovanou silou $F=300.D^2, 100.D^2, 50.D^2, 25.D^2$ N, po dobu $t = 10, 30, 60, 120, 180$ s, do lesklé rovné plochy zkušebního vzorku nebo zkušenské součásti. Zkouší se na Brinellově tvrdoměru. Tvrdost určujeme podle průměru vtisku, který měříme dvakrát (kolmo na sebe), abychom vyloučili chyby vzniklé nepřesností vtisku“.[12].

Zatížení se volí dle vztahu $[F=KD^2]$

Koeficient K je volen:

Ocel – K30,

Neželezné kovy a slitiny k=10

Měkké neželezné kovy a kompozice K=2,5

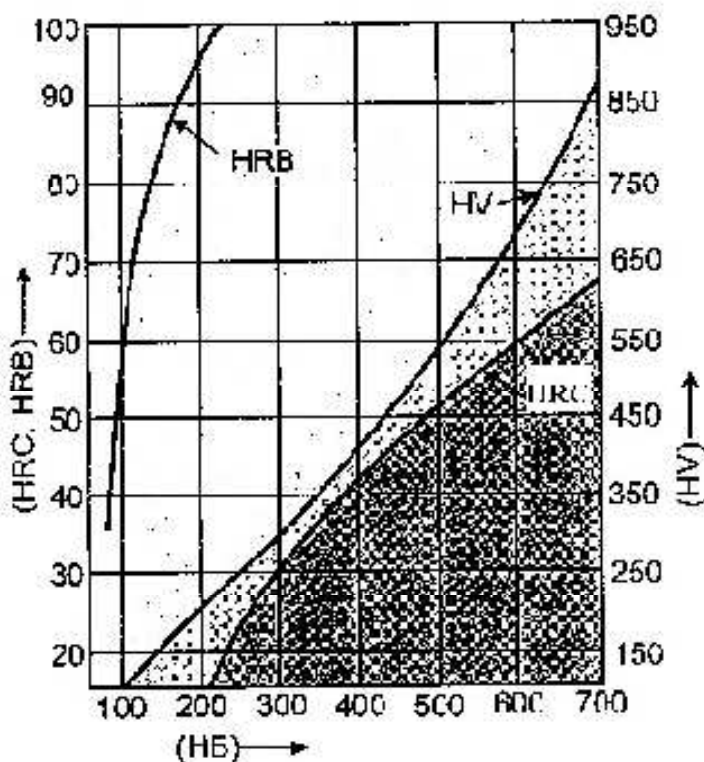
Doba zatěžování se volí:

Ocel a litiny – 10 až 15 s

Neželezné kovy – 10 až 180 s.[13].

Pokud měříme materiál, který je tvrdší než HB=400, ocelová kulička se již nepoužívá. Použijeme kuličku ze slinutých karbidů.

„Výsledek zkoušky za normálních podmínek, tj. při $D=10\text{ mm}$, $F=29\,430\text{ N}$ (300kp) a době zatížení 10 až 15 s, se označuje pouze číslem tvrdosti a písmeny HB v pořadí: $D\text{ (mm)}$, $F\text{ (kp)}$, doba zatížení (s), např. HB 5/750/20=280. Velikost vtisku musí být mezi hodnotami $0,25D$ a $0,6D$ “.[14].



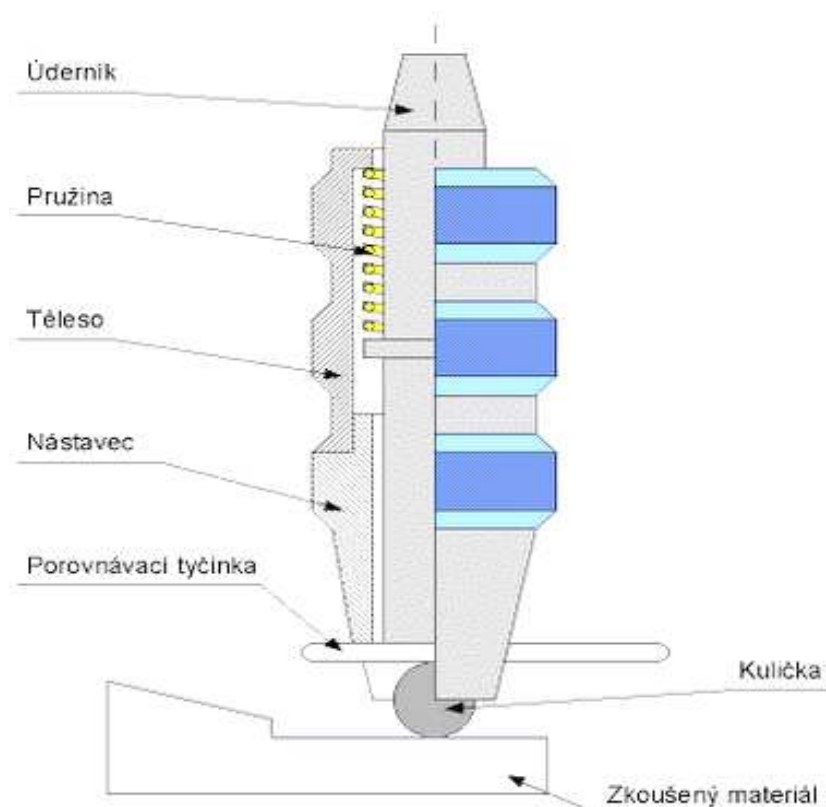
Obr. 2.8 Srovnání jednotlivých tvrdostí

Mezi tvrdostí HB a pevností v tahu R_m (MPa) je přímá závislost dle vztahu:

$$[R_m = k \cdot HB]$$

Koeficient k je závislý na materiálu, u ocelí je k v rozsahu 3,1 až 4,1.

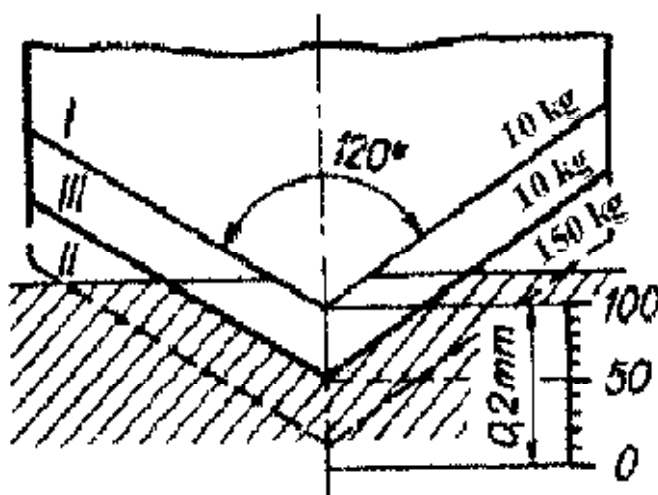
Litý bronz má $k=2,3$, hliník $k=2,6$



Obr. 2.9 Poldi tvrdoměr

Rockwellova zkouška tvrdosti

Rockwell použil při zkoušce tvrdosti „diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° se zaobleným poloměrem $0,2\text{ mm}$ “.[15].



Obr. 2.10 Princip měření HRC tvrdosti

Silou 98 N zatížíme ocelovou kuličku, nebo diamantový kužel, který se dotýká zkoušeného předmětu. Prostřednictvím normovaného zatížení, které zvýšíme o zkušební zátěžovou sílu, například v hodnotě 1373 N , což je 1471 N působíme po dobu cca 6 sekund

na zkoušený materiál. Abychom zjistili hloubku vtisku h odečteme normovanou sílu 98 N. Naměřenou hodnotu tvrdosti získáme odečtením na číselníku ukazatele.

„HRA je tvrdost určená diamantovým kuželem při celkovém zatížení 588 N (pro křehké materiály a tenké povrchové vrstvy)

HRB je tvrdost určená kalenou ocelovou kuličkou o průměru 1/16“ při celkovém zatížení 980 N (pro měkké kovy)

HRC je tvrdost určená diamantovým kuželem při celkovém zatížení 1471 N“.[16].

Vickersova zkouška tvrdosti

„Indentorem je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem stěn 136° takže vznikají pravidelné čtyřhranné vtisky. Tento úhel je volen tak, aby tření co nejméně ovlivňovalo výsledek a dále proto, aby se hodnoty tvrdosti příliš neodlišovaly od tvrdosti stanovené metodou dle Brinella. Po provedení vtisku se měří jeho úhlopříčka. Její hodnota je pak dosazena do vztahu“:[17].

$$[HV=0,189 F/u^2]$$

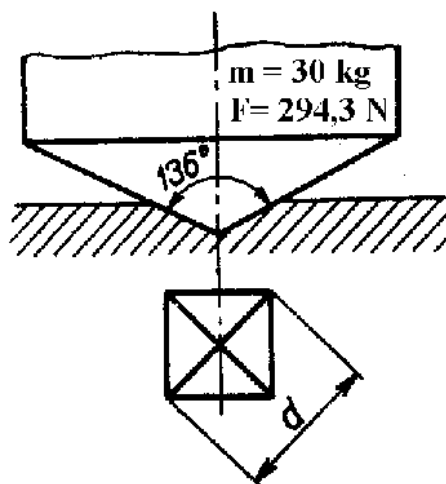
F – zátěžná síla (N),

u – průměrná hodnota úhlopříčky (mm)

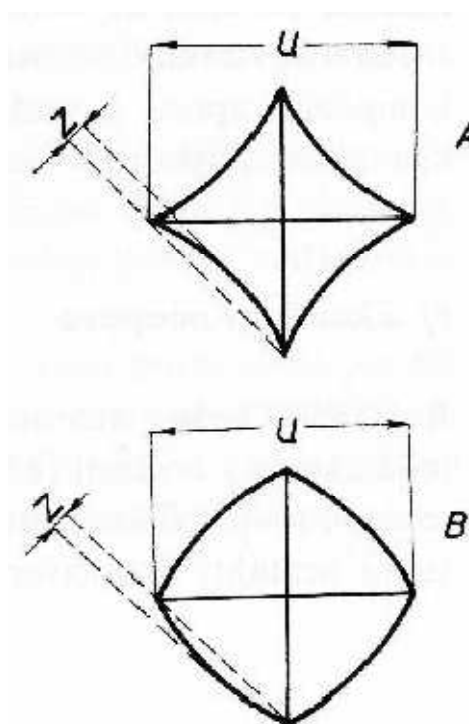
Vickersova metoda je velmi výhodná a ze všech metod jedinečná, protože zahrnuje hodnoty ve stupnici tvrdosti od nejměkčích kovů až po nejtvrďší kalené ocele. Tato zkouška má také velmi přesné výsledné hodnoty. Příliš nepoškozuje obrobenou plochu měřeného materiálu.

Nevýhody Vickersovy zkoušky tvrdosti:

Jednoznačné výsledky nelze očekávat u kovů hrubozrnných nebo nehomogenních (šedá litina, ložiskové kompozice), protože dochází k malým vtiskům. [18].



Obr. 2.11 Schéma zkoušky dle Vickerse



Obr. 2.12 Deformace vtisku

2.2.4 Pevnost

Pevnost je mechanická vlastnost, která odolává mechanickému zatížení pevných látek. Pokud se při zatížení překročí mez pevnosti, materiál se poruší a dochází k deformacím a destrukcím. [1].

2.3 Fyzikální vlastnosti

2.3.1 Hustota

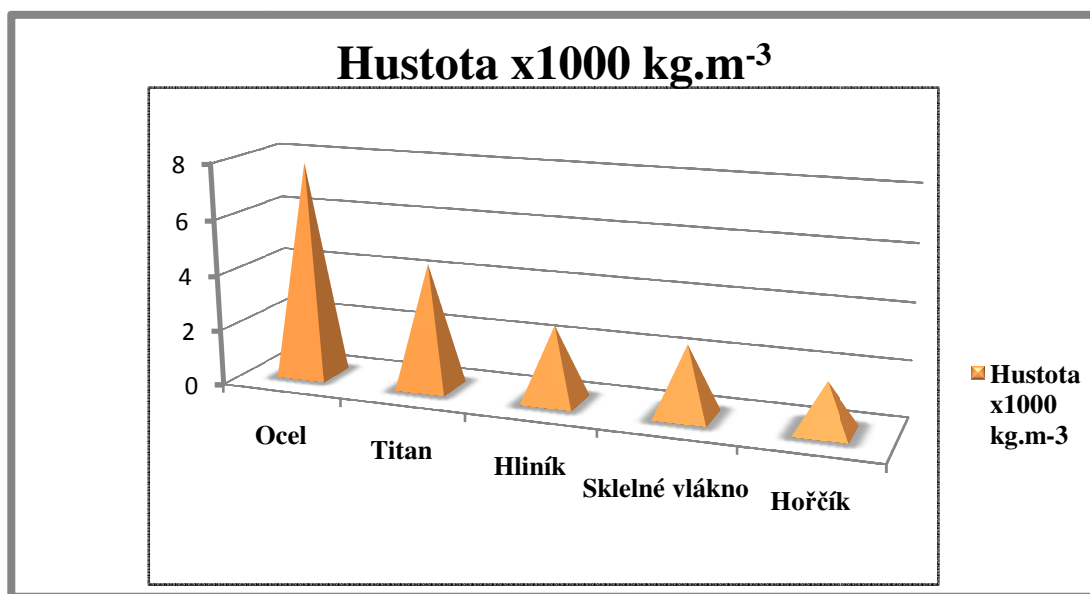
Hustota materiálu je pro letadlové konstrukce velice důležitá. Jeden z nejdůležitějších požadavků je minimální prázdná hmotnost konstrukce. Hlavní požadavky jsou tedy na materiály s menší měrnou hmotností. Hustota ρ je dána poměrem hmotnosti m k objemu V homogenní látky při určité teplotě.[1].

$$\rho = \frac{kg}{m^3} = \frac{m}{V}$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Obr. 2.13 Vzorec pro výpočet hustoty

„Hustota závisí na složení látky (u chemických čistých látek je závislá na atomové struktuře – tedy na pořadí v periodické soustavě prvků) a na jejím stavu, zejména teplotě, u plynů také na tlaku“.[1].



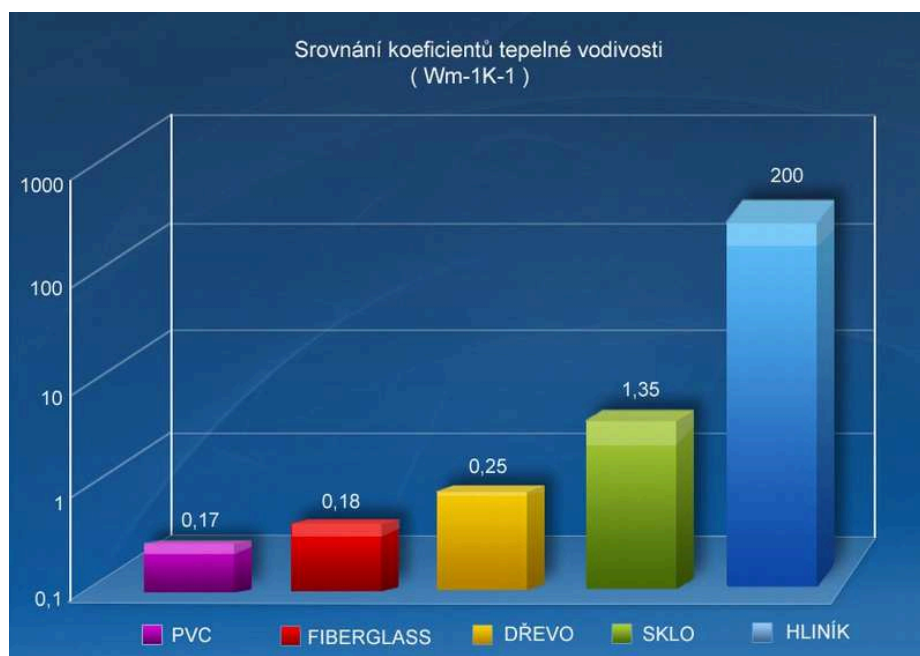
Graf 2.1 Hustota vybraných materiálů a prvků

2.3.2 Bod tání a tuhnutí

Další hlavní charakteristikou je *bod tání a tuhnutí*. Je to teplota, při níž látka mění své skupenství z pevného na kapalné. Uvádí se u nich teplotní rozsah tavení a tuhnutí. Zcela přesnou teplotu tání a tuhnutí mají chemicky čisté látky. Tyto teploty jsou velice důležité při zpracovávání těchto látek ve strojírenství či svařování.[1].

2.3.3 Tepelná vodivost

„ λ [W/mK] Je to množství tepla Q [J], které při ustáleném stavu projde za jednotku času mezi dvěma protilehlými stěnami krychle o délce hrany 1 m, je-li rozdíl teplot mezi těmito stěnami 1 K“.[19].



Graf 2.2 Srovnání koeficientů tepelné vodivosti

Materiály, které jsou vyrobeny z kovu, jsou lepším vodičem, než nekovové materiály. Stříbro je nejlepším vodičem. Díky tomu se tepelná vodivost u jiných materiálů porovnává právě se stříbrem.

2.3.4 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost ρ (S). Specifickou vlastností je vést elektrický proud. Vodič s odporem 1 Ω má vodivost 1 S (siemens). U letadel je elektrická vodivost velmi významná především pro elektrickou soustavu.

Materiály můžeme rozdělit do tří skupin podle vodivosti, a to na:

vodiče – vedou dobře elektrický proud, protože mají malý odpor,

polovodiče – využívají se v elektronice, protože mají specifické vlastnosti,

nevodiče neboli izolanty – nevedou elektrický proud, protože mají velký odpor.

Stříbro je nejlepším vodičem elektrického proudu. Měď je z praktických důvodů častěji využívána pro porovnávání s ostatními vodivými materiály. „Pokud tedy měď, má v tomto

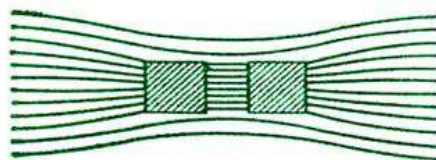
srovnání vodivost 100 %, potom stříbro má vodivost 119 %, hliník má 63 % a ocel už jenom 13 %“.[1]

2.3.5 Permeabilita

Permeabilita je fyzikální vlastnost, která vyjadřuje chování materiálu v magnetickém poli a vlivy působících magnetických sil. Některá prostředí poměr sil zesiluje a některá ji naopak zeslabuje.[20].

Paramagnetické látky

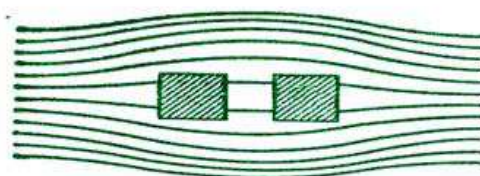
Paramagnetické látky ($\mu_r > 1$) zesilují magnetické pole. Patří mezi ně například hliník, mangan, chrom a platina. „Magnetizace paramagnetik je tedy založena na stáčení magnetických momentů atomů do směru působícího magnetického pole“.[21].



Obr. 2.14 Magnetické indukční čáry jsou koncentrované v paramagnetické látce

Diamagnetické látky

Diamagnetické látky ($\mu_r < 1$) magnetické pole zeslabují. Týká se to většiny organických sloučenin a kovů například Au, Ag, Cu, Sn, Pb.



Obr. 2.15 Magnetické indukční čáry jsou vytlačené z diamagnetické látky

Feromagnetické látky

Feromagnetické látky, jejichž relativní permeabilita je velká (10^2 až 10^5), jsou závislé na vnějším magnetickém poli. I když magnetické pole nevykazuje žádné silové hodnoty, feromagnetické látky zůstávají zmagnetizované. Magneticky měkké materiály jsou vhodné do elektrotechnických obvodů a magneticky tvrdé jsou vhodné jako permanentní magnety, například Fe a Ni. [22].

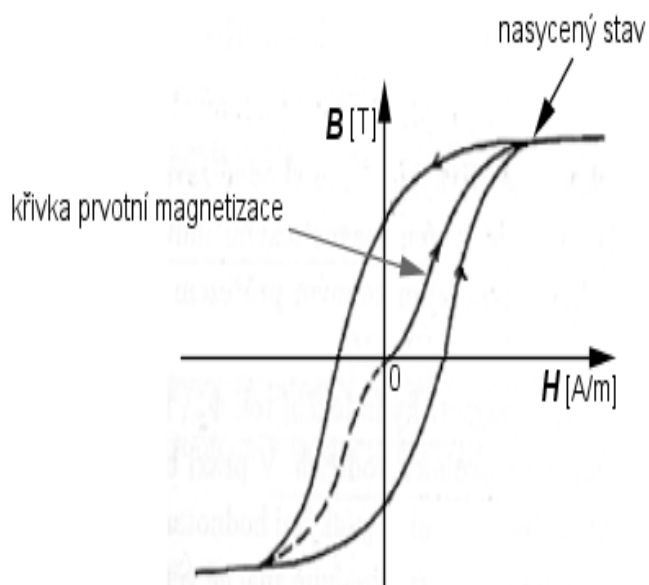
Druh látky	Relativní permeabilita μ
Diamagnetická	Nepatrně menší než jedna
Paramagnetická	Nepatrně větší než jedna
Feromagnetická	Mnohem větší než jedna

Tab. 2.3 Rozdělení permeability do tří základních skupin

Druh kovu	ρ kg/m ³	λ W/mK	c kJ/kgK	β 10 ⁻⁶ K
Hliník	2 700	221	0,920	23,8
Olovo	11 340	35	0,130	29
Železo	7 860	67	0,465	12
Litina	7 200 až 7 300	42 až 63	0,545	9
Ocel 0,2 % C	7 850	50	0,460	11
Ocel 0,6 % C	7 840	46	0,460	11
Měď	8 900	393	0,390	17
Zinek	7 140	109	0,376	29

Tab. 2.4 Hodnoty fyzikálních veličin vybraných kovů – hustota, tepelná vodivost, tepelná kapacita, roztažnost

ρ – je měrná hmotnost, λ – součinitel tepelné vodivosti, c – měrná tepelná kapacita, β – teplotní součinitel roztažnosti



Obr. 2.16 Hysterezní křivka

3 Konstrukční materiály používané v současnosti

3.1 Kovy

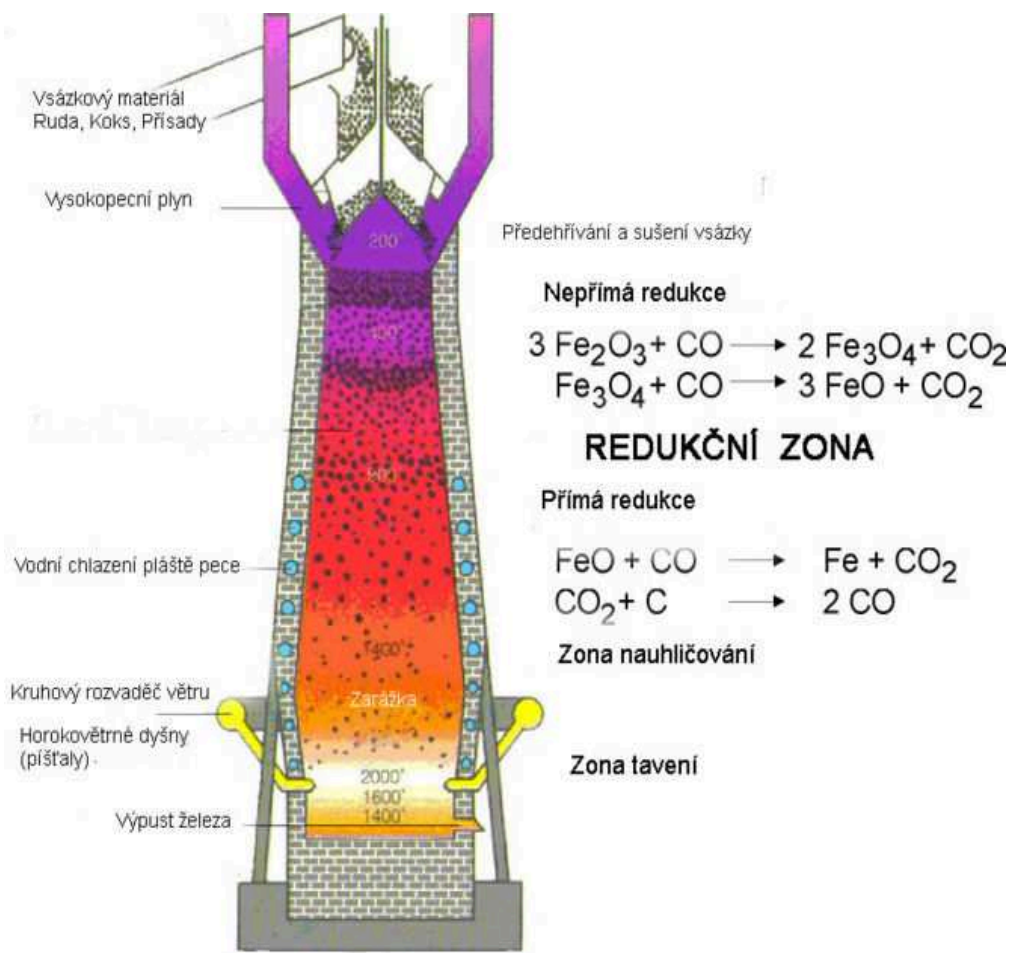
V letectví se používá široká škála oceli a litiny, které jsou na místech s velkým namáháním. Ocel obsahuje méně než 2,11 % uhlíku a je slitina železa, uhlíku a dalších prvků. Pokud se v oceli nachází více než 2,14 % uhlíku, mluvíme tedy o litinách. Ocel se vyrábí ve vysoké peci, která ze surového železa produkuje železo s uhlíkem a další prvky. Dnes je vyráběno zhruba 2500 druhů ocelí. Ocel můžeme rozdělit do těchto skupin:

Nelegované oceli, jinými slovy uhlíkové oceli obsahují méně legujících prvků než je maximální tabelovaná hodnota. Hmotnostní podíl kolem 2 % je pro většinu prvků maximální.

Nízkolegované oceli obsahují méně než 5 % legujících prvků s odečtením obsahu uhlíku. Platí pravidlo, že čím vyšší obsah uhlíku se v oceli nachází, tím je pevnější a naopak. Můžeme je tepelně zpracovávat a tímto ovlivňovat jejich mechanické vlastnosti. Vlastnosti oceli nízkolegované se podobají vlastnostem nelegované oceli.

Vysoce legované oceli obsahují více než 5 % legujících prvků. Požadované mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti těchto druhů ocelí získáme prostřednictvím kombinace legujících prvků.[23].

Kvalitní ocel se vyrábí pomocí takzvaného zkujňování surového železa. Je to proces, kdy se okysličují doprovodné prvky. Toto se děje ve vysoké peci. Ocel se vyrábí v konvertorech či Siemens-Martinových pecích



Obr. 3.1 Siemens – Martinová pec

Jakmile skončí zkujňování, vyrobená ocel se vylije z pece do pánve. „Z pánve se plní kovové formy kokily, kde ocel tuhne na ingoty, které se potom zpracovávají jako tvářená ocel. Nebo se z pánve ocel odlévá do slévárenských forem, kde tuhne na ocelové odlitky“. [1].

Mezi *doprovodné prvky* patří: vodík, dusík, fosfor, kyslík a síra.

Vodík se do oceli dostává v kapalném nebo tuhém stavu. Pokud přidáme příliš velké množství vodíku, tak způsobíme menší tažnost oceli.

Velké množství dusíku způsobí rychlé stárnutí a tím se sníží houževnatost.

Z použitých surovin se do oceli dostává fosfor. Při větším množství snižuje vrubovou houževnatost, za studena je lámavější a zvyšuje se přechodová teplota.

Při výrobě oceli se snažíme minimalizovat množství kyslíku ze stejných důvodů, jako je třeba minimalizovat množství fosforu. Do ocelí se kyslík dostává při zkujňování.

Posledním prvkem je síra. Ta se do oceli dostává během výrobního procesu ve vysoké peci a také z rud. Spojením železa se sírou vznikne sulfid železnatý (FeS), který je nerozpustný. Sulfid zhoršuje houževnatost a tvárnost oceli. [1].

Dalším kovem jsou *litiny*. Je to slitina železa s uhlíkem. Obsah uhlíku musí být větší než 2 %. Litina má tyto vlastnosti: nízká pružnost, odolává vysokému tlaku i teplotě.

Proces výroby litiny je následující. Taví se v peci, která má válcovitý tvar při teplotě okolo 1500 °C. Vyrábí se ze surového železa, ocelového šrotu, vápencem a koksem. Vyrábí se v kuplovně. Tyto litiny se nesmí ani rychle, ani pomalu ochlazovat, jinak by měly špatné vlastnosti a musely by se dále zpracovat. Pokud se litina ochlazuje pomalu, má barvu šedou. Musí se očkovat hořčíkem. Využívá se při výrobě klikových hřídelí či ozubených kol. Je pevnější a tvárnější. Ovšem pokud litinu ochladíme rychle, vznikne bílá litina. Ta je tvrdá a špatně obrobitelná. Musíme je tedy 6 hodin žíhat při teplotě 900 °C. Tím bílá litina změkne. Po této fázi se nazývá temperovaná. [24].

Železo se vyrábí ve vysoké peci, která má 30 m na výšku a 9 m na šířku. Je vyrobena ze žáruvzdorných cihel, které odolají vysokým teplotám. Uvnitř pece, se pohybuje teplota okolo 1500 °C. Do pece se horní části vkládá těžená ruda nazývaná hematit a magnetit spolu s vápencem a koksem pomocí zásobníku surovin. Ve spodní části peci se vhání horký vzduch tzv. *dmýšními trubicemi*. Koks je při výrobě železa velice důležitý, protože odebírá rudě kyslík. Při tak vysokých teplotách se železo taví a postupně stéká na dno vysoké pece. Ruda obsahuje nečistoty jako je hornina s jílem, která se smíchá s vápencem a vytvoří tzv. *strusku*. Ta se nachází na povrchu rudy a slévá se do pánví.

3.1.1 Zpracování kovů

Kovy používáme kvůli jejich pevnosti. Můžeme je také různě zpracovávat a tvarovat. Nejčastější způsob je kování kovu v horkém stavu, odlévání roztaveného kovu do různých forem či válcování. Můžeme jej také různě zpracovávat a to pomocí obráběcího stroje, který by měl mít velmi silný motor. Ten dokáže vrtat, brousit či řezat kovové díly. Soustruhy patří mezi nejpoužívanější obráběcí stroje. Pomocí ostrých fréz a řezných nástrojů rotujících kolem kovové tyče, ozubenými řezacími koly přeřezávají drážky a štěrbinu.[2].

Odlévání

Prvním způsobem je odlévání. Rozžhavený kov se nalije do vodou chlazené nádoby se štěrbinou. Model, který má být odlit se dá do bedny, a kolem modelu se udusá jíl, který po

vyschnutí zanechá dutinu, do které se po vyvrtání otvorů nalije rozžhavený kov. Vyvrtané otvory slouží k tomu, aby v dutině nebyl vzduch. Forma se rozbije a odlitek se vyjme až po vychladnutí kovu.



Obr. 3.2 Odlévání

Kování

Dnes se nejčastěji používá zápustkové kování. Je to způsob, kdy se rozžhavený kov vtlačí pomocí mechanického kladiva do zápustky. Při postupu proražení plech leží na ploché formě, která se nazývá raznice. Při úderu mechanického kladiva dostane plech tvar raznice.



Obr. 3.3 Kování

Válcování

Další způsob zpracování kovů je válcování. Válcovat můžeme například ocelové desky, které při zahřátí necháme projet velkými válci, které desku ztenčí. Postupně dostaneme tloušťku, kterou jsme požadovali. [2].



Obr. 3.4 Válcování

3.2 Nekovy

Jsou nepostradatelné konstrukční materiály a také hlavní suroviny pro výrobu slitinových ocelí.

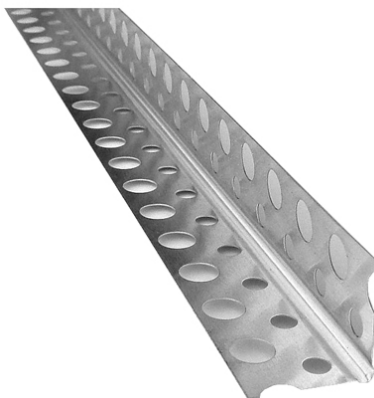
Všechny kovy kromě železa rozdělujeme podle měrné hmotnosti. V letectví jsou nejdůležitější lehké s hustotou menší než 5000 kg.m^{-3} . Jsou to slitiny hliníku, hořčíku a titánu. Potom jsou těžké s hustotou větší než 5000 kg.m^{-3} , ovšem tyto neželezné kovy se používají mimo konstrukce soustav draku. Jsou to slitiny hlavně mědi, zinku, cínu, olova, niklu, antimonu a kobaltu. Speciální kovové materiály jako například zlato a stříbro se využívají v elektronických přístrojích.[1].

Neželezné lehké kovy

V konstrukci letadel se používají i tyto kovy: *hliník, hořčík a titan*.

Hliník, který má chemickou značku *Al* a má největší zastoupení mezi kovovými prvky na naší Zemi, je velice lehký a hojně používaný ve formě slitin v leteckém průmyslu. Používá se v elektrotechnice díky dobrému vedení elektrického proudu. Hliník se vyrábí z bauxitu a z oxidu hliníku je získáván elektrolýzou. Mezi jeho hlavní vlastnosti patří dobrá odolnost proti povětrnostním vlivům a korozi. Má stříbřitě šedou barvu, je nestálý, kujný a extrémně reaktivní kov.[25]. Charakteristická je jeho malá hustota 2700 kg.m^{-3} , má dobrou elektrickou

vodivost (61 %), tepelnou vodivost $234 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Teplota tání je 660°C a vře při 2467°C , je nemagnetický, dobře tvárný za tepla i studena.[1].



Obr. 3.5 Hliníková lišta

Hořčík, který má chemickou značku *Mg* je stříbrobílé barvy. V normálních podmínkách je stabilní, málo reaktivní kov. Je po beryliu druhý nejlehčí kov. Používá se při výrobě lehkých a pevných slitin. Pokud hořčík ohřejeme na teplotu okolo 800°C , reaguje s kyslíkem. Hůře vede elektrický proud a teplo. Proto je ideální materiál pro letecký průmysl.[26]. Charakteristickými vlastnostmi hořčíku jsou velmi malá hustota $1740 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, je tvárný a kujný pouze za tepla. Taví se při 649°C a vře při 1107°C . Je nemagnetický, ve vlhku podléhá korozi.[1].



Obr. 3.6 Hořčík

Titan má stříbřitě bílou barvu a chemickou značkou *Ti*. Je to lehký kov, odolný vůči korozi a poměrně tvrdý kovový materiál. Titan se používá v letecké dopravě kvůli jeho lehké hmotnosti s velkou pevností. Reaguje s velkým množstvím nekovů, například s dusíkem, kyslíkem, vodíkem či uhlíkem.[27]. Charakteristickými vlastnostmi titanu jsou jeho hustota $4490 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Taje při 1670°C , vře při 3287°C . V nízkých teplotách hrozí extrémní křehkost, do červena ohřátý vykazuje dobrou kujnost a tažnost. Dobře se svařuje, ale obtížně obrábí, je nemagnetický. [1].



Obr. 3.7 Krystaly kovového titanu

Neželezné těžké kovy

Měď má chemickou značku *Cu*. Vyznačuje se dobrou elektrickou a tepelnou odolností a nepodléhá korozi. Využívá se u letadel především v elektrotechnice a radiokomunikačních systémech. Má červenohnědou barvu a prosvítá zelenomodře. Měď se dá velmi dobře zpracovat, jak za studena, tak za tepla, ovšem čistá měď se špatně slévá.[28]. Vlastnosti mědi jsou tání při 1083 °C a vře při 2567 °C, hustota 8940 kg.m⁻³. Je ale málo atraktivní pro letadlové konstrukce.[1].



Obr. 3.8 Plech z mědi

Nikl má chemickou značku *Ni*. Je velmi dobře zpracovatelný za studena a tepla a odolává korozi. Má lesklý kovový vzhled a barvu má stříbrobílou. Má také feromagnetické účinky. Nikl se dá dobře válcovat, svářet a leštit. Velice zřídka se objevují výrobky z čistého niklu.[29]. Charakteristickými vlastnosti niklu jsou hustota 8900 kg.m⁻³, taje při 1455 °C a vře při 2730 °C. [1].



Obr. 3.9 Nikl

Olovo je dobře tvárné za studena i tepla. Chemickou značku má *Pb*. Z olova se vyrábí akumulátory, oplášťují se kabely. Má velmi nízký bod tání a je velmi odolný vůči korozi. Dobře odolává vůči vlhkosti. Velká část spotřeby olova jsou jeho slitiny.[30]. Mezi charakteristické vlastnosti olova patří jeho hustota 11300 kg.m^{-3} . [1].



Obr. 3.10 Olovo

Zinek s chemickou značkou *Zn* se používá při výrobě barviv. Je dobře tavitelný, měkký a křehký. Má hexagonální strukturu krystalové mřížky, proto se dobře slévá, ale má horší plasticitu.[31] Charakteristické vlastnosti zinku jsou hustota 7130 kg.m^{-3} , taje při $420 \text{ }^{\circ}\text{C}$, vře při 907°C , tvárný se stává až mezi $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ až $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$. [1].

Vlastnosti a slitiny neželezných kovů

V čistém stavu se neželezné kovy v leteckém průmyslu nepoužívají. Abychom tyto neželezné kovy mohli použít, musíme je zušlechťovat. Proto se většinou setkáváme se slitinami neželezných kovů. Mezi hlavní požadavky slitin neželezných kovů patří jejich pevnost a hustota materiálů. Například hliníkové slitiny mají velice dobré vlastnosti, a proto se využívají v leteckém průmyslu. Jsou velmi dobře obrobitelné, nepodléhají korozi, mají malou hustotu a jsou nemagnetické. Díky přidáním prvků jako je měď, zinek, nikl, křemík či mangan se získá velmi dobré vlastnosti. Hliníkové slitiny získají dobré vlastnosti také pomocí tepelného zpracování nazývané též *vytvrzování*. [1].

Slitiny hliníku

Dural

Dural obsahuje 90-96 % hliníku a 4-6 % mědi s malými přísadami manganu a hořčíku. Díky manganu odolává korozi.[32]. Má malou měrnou hmotnost $2,7 \text{ g/cm}^3$ díky ní je na prvním místě v letecké výrobě a zaujímá 80 % prázdné hmotnosti draku letounu v celokovových konstrukcích. Je také až pětikrát pevnější v tahu oproti čistému hliníku. Známe jej také pod označením slitina hliníku 2017. Charakteristickými vlastnosti duralu jsou

jeho velmi dobrá obrábitelnost, dobrá chemická odolnost, v ochranné atmosféře se spojuje pomocí svařování. Dural ovšem málo pohlcuje nárazy a neumí tlumit otřesy díky malé anelasticitě.

Nosníky, přepážky, žebra a nosné potahy letadel jsou konstruovány z vysoce legovaného duralu D16, uplatněného v silových prvcích draku.

K výrobě nýtů se používá nízko legovaný dural D18.[1].



Obr. 3.11 Dural

Silumin

Silumin je slitina hliníku s křemíkem. V leteckém průmyslu je silumin nejrozšířenější hliníková slitina k odlévání. Slitina AL9 se používá se k výrobě přírub, pák, konzol ale i k jiným součásti letounu, protože má dobré mechanické vlastnosti.[1].

Název		silumin beta	silumin gamma žih.	silumin gamma zušl.
Stav		pouze litý	ohř. na 150° C po 20 hodin	kalený z 510° C a vyhř. na 150° C po 20 hodin
mez průtažnosti ..	kg/mm ²	9—10,5	11—15	18—25
pevnost v tahu ...	kg/mm ²	17—20	19—22	25—29
tažnost	%	2— 5	4— 1	4—0,5
tvrdost Brinell		55—65	65—75	80—100
mez únavy při zkoušce				
ohybem za rotace ..	kg/mm ²	6,5	6,5	8,5

Tab. 3.1 Vlastnosti siluminu

3.3 Přírodní materiály

Další materiály jsou přírodniny. Zejména dřevo se kdysi hojně používalo při výrobě letadel, protože bylo snadno dostupné a lehce zpracovatelné. Ovšem dnes se dřevo vůbec nepoužívá, jen při stavbě lehkých letadel. Při výrobě pneumatik a hadic se používá pryž. Keramické materiály a sklo se u letadel využívají jako izolace nebo jako součást vícevrstevných materiálů. Keramické materiály se uplatňují také u raketoplánů, protože mají odolnost vůči

vysokým teplotám. Aby mohli konstruktéři snížit hmotnost letadla, začali používat umělé materiály a kompozity. Kdysi se umělé materiály tolik nepoužívaly, protože nebyly tak dostupné jako dnes. Využívány byly v sekundární konstrukci, ovšem dnes je jich využíváno i u primárních konstrukcí letadel. Kompozitní materiály se používají při výrobě draku. [1].

4 Materiály třetího tisíciletí

V dnešní době se konstruktéři dopravních letadel rozhlíží po lehkých materiálech, díky kterým by dopravní prostředky spotřebovávaly méně paliva. Již před 35 lety začínal profesor *Pavel Lukač* i jeho tým zkoumat hořčíkové slitiny. V té době se o toto téma mezi vědci nikdo nezajímal, ovšem dnes tito vědci mají u nás i ve světě velké uznání. Velké průmyslové instituce se zajímají o jejich výsledky a hlavně o zkušenosti, které při průzkumu získali.

Vlivem tohoto výzkumu se v dnešní době vědci zaměřili na hledání uplatnění lehkých kovových materiálů, což jsou například hliník, titan a hořčík, který je zároveň nejlehčím prvkem. Mezi hlavní nevýhodu tohoto prvku je to, že má malou pevnost a je velmi náchylný na korozi. Zlepšením jeho vlastností jsou slitiny s jinými prvky jako například zinek, mangan a zinek či křemík. Díky malé pevnosti a odolnosti byly hořčíkové slitiny vytlačeny hliníkem a jeho slitinami hlavně díky jeho lepším vlastnostem. Jeho hlavní nevýhodou je vyšší hmotnost.

Hořčík začíná jít nově do popředí zájmu. Také kompozitní materiály se začínají probíjet v leteckém průmyslu do předních pozic uplatnění. Základní látka kompozitních materiálů je vyztužení částicemi jiného materiálu. Mezi hlavní části patří laminát, který je tvořený plasty proloženými tkaninou či vlákny z jiného materiálu, kterými jsou například papír či sklo. [33].

Z laminátu se nejčastěji vyrábějí čelní skla na letadlech. Mezi nejznámější druh laminátu je umakart.

4.1 Slitiny hořčíku – elektron

Hořčík má bělošedou barvu s hustotou 1738 kg.m^{-3} je lehký kov, který je šestým nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře. Používá se hojně ve výrobě kovových předmětů a je hlavní součástí lehkých slitin. Tato slitina se používá pro výrobu leteckých součástek. Kovový hořčík je reaktivní, proto se tavení, odlévání či svařování hořčíkových slitin musí provádět pod ochrannou atmosférou, které obsahují fluorid sírový SF_6 . [34].

Obvyklé složení dobrého kovu bývá:

Množství v %	rafinovaný přetavením	sublimovaný
křemíku	0,01—0,03	< 0,001
železa + hliníku	0,02—0,05	0,005
manganu	stopy —0,02	< 0,002
chloru	0,01—0,03	0,001
dusíku	0,01—0,02	0

Čistý hořčík má tyto základní fyzikální a mechanické vlastnosti:

měrná váha při 20° C	1,74	
pevného při teplotě tavení	1,65	
roztaveného při 680° C	1,55	
bod tavení	650° C	
bod varu při normálním tlaku	1097° C	
smršťivost	1,95%	
lineární součinitel tepelné roztaživosti při 20° C ..	$24,3 \times 10^{-6}$	
za vyšších teplot dosti značně stoupá, takže do- sahuje při 400° C již	$30,7 \times 10^{-6}$	
měrné teplo při 20° C	0,25 cal/g ° C	
tepelná vodivost při 20° C	0,41 gcs	
za vyšších teplot nepatrně klesá		
elektrická vodivost při 0° C	25,6 m/mm ² Ω	
za vyšších teplot rychle klesá		
modul pružnosti v tahu	4200 kg/mm ²	
ve smyku	1700 kg/mm ²	
Pevnostní vlastnosti ve stavu	litém do písku	kovaném
mez průtažnosti	kg/mm ² 3	15
pevnost v tahu	kg/mm ² 9—11	22
tažnost	% 5	7
tvrdost Brinell		25

Tab. 4.1 Základní vlastnosti čistého hořčíku

Slitina pod obchodním názvem *Elektron* byla vyvinuta německou firmou Griesheim-Elektron v roce 1908.

Je to slitina *hořčíku* nejméně 90 % Mg s *hliníkem* (nejvýše 10% Al), *zinku* (Zn) nebo *manganu* (Mn). Elektron má velmi nízkou hustotu (1,8 g/cm³), díky manganu dobře odolává korozi. Tato slitina má vysokou pevnost, nízkou hmotnost a vysokou tvarovou stabilitu. Vlivem těchto vlastností se tato slitina hojně využívá v leteckém průmyslu. Elektron se využívá pro přesné lití složitých součástí. Vyrábí se z ní části, jako jsou skříně náhonů a převodů, skříně reduktorů, namáhané motorové skříně, kostry leteckých radiových přijímačů. Mezi nevýhody elektronu patří jeho velmi vysoká hořlavost třísek, které vyvíjí teplotu okolo 2200 °C.[35].

Druh	Označení v DIN 1717	Složení v procentech			Odpovídající značky		
		Al	Zn	Mn	elektron	magnewin	magnedur
ke tváření	Mg-Al 3	2—4	0—1,5	0—0,5	AZ 21, AZ 31	3512	W 383
	Mg-Al 6	6—7	0—1,5	0—0,5	AZM	3510	W 386
	Mg-Al 9	8—11	0—1,5	0—0,5	AZ 855, V 1	3515	W 389
	Mg-Zn	—	4—5	0—0,2	Z 1b	40	W 384
	Mg-Mn	—	—	1—2,5	AM 503, AM 537	3501	W 380
na odlitky	G Mg-Al	7—11	0—0,5	0—0,5	AZ 91, A 8 A8K, A9V	3508 3508 S	—
	G Mg-Al 3-Zn	2,5—3,5	0,5—1,5	0—0,5	AZ 31	—	—
	G Mg-Al 4-Zn	3—4,5	2—3,5	0—0,5	AZF	—	—
	G Mg-Al 6-Zn	5—6,5	2—3,5	0—0,5	AZG	—	—
	G Mg-Mn	—	—	1—2,5	AM 503	—	—
	G Mg-Si	—	0,5—2% Si	—	CMSi	—	—

Tab. 4.2 Vlastnosti slitin hořčíku dle normy DIN 1717

Druh	Značka	Normální složení v %			Stav	Mechanické vlastnosti					
		Al	Zn	Mn		mez pružnosti (0,02%) kg/mm ²	mez průtaž- nosti (0,2%) kg/mm ²	pevnost v tahu kg/mm ²	tažnost na 10d %	tvrdost Brinell	mez únavy*) kg/mm ²
Ke slévání	AZG	6,0	3,0	0,3	litý do písku	4—5	9—10,5	16—20	3—6	50—58	7—8
	AZF	4,0	3,0	0,3	litý do písku	4	8—9	17—21	5—9	47—52	5,5—7,5
	A9V	8,5	0,5	0,3	litý do písku a zušlech.	4,5—5	10—11	24—27	8—12	56—63	8—10
	AZ 91	9,0	1,0	0,3	litý do kokily	5	11—13	18—22	2,5—5	60—65	7—8
Ke tváření	AZM	6,5	1,0	0,3	plech	10	18—22	28—32	10—14	58—63	
					tyče a výlisky	17—19	20—22	28—32	11—16	60—65	13
	AZ 855	8,0	0,3	0,2	kované vrtule	18—20	21—23	29—32	8—12	68—75	13—14
	AZ 31	3,0	1,0	0,3	plech		16—18	25—28	12—18	55—60	
	AM 503	—	—	1,5	plech	5	8—14	19—23	5—10	39—42	
					tyče a profily	8—10	14—17	19—23	1,5—5	41—46	7
	V 1	10,5	—	0,3	lisované písty	19—21	23—28	33—37	7—9	70—78	12

Tab. 4.3 Nejvýznamnější slitiny hořčíku v leteckém průmyslu

4.2 Kompozita

Kompozitní materiály, které člověk poznal teprve před 20 ti lety, jsou mezi výrobci stále více uznávaným materiálem. Mají více výhod než záporů, proto se stávají velice využívanými materiály. V budoucnu se může také stát, že kompozita nahradí různé materiály jako například dřevo. Kompozitní materiály se používají už i v primární konstrukci draku letadla a při výrobě tenkostěnných konstrukcí.

Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se skládají ze dvou nebo více různých složek, které mají ovšem jiné chemické nebo mechanické vlastnosti. První složka se nazývá výztuž, která je pevnější, tvrdší a tužší nespojitá složka. Druhá složka se nazývá matrice, které je naopak spojitá a plní funkci pojiva výztuže. Když spojíme tyto složky dohromady, tak vznikne úplně nový materiál, který má vynikající vlastnosti. Aby mohl být vícefázový materiál zařazený mezi kompozity dosaženy jisté podmínky. Podíl výztuže musí dosáhnout nejméně 5 %. Mísením jednotlivých složek musíme dosáhnout požadovaného kompozitu. V potaz se musí brát odlišné mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti matrice a výztuže, která je pevnější v tahu a vykazuje vyšší stupeň tuhosti než matrice.

Pokud nesplníme všechny tři podmínky, nemůžeme materiál považovat za kompozit. Mezi kompozit nemůžeme brát plast podle těchto podmínek, protože obsahují malé množství tuhých barviv (černý pigment) nebo oxidy (bílý pigment). Slitiny kovů také ne, protože při tepelném zpracování nebo ochlazování dochází k vyloučení tvrdé fáze. Ovšem kov disperzně zpevněný částicemi oxidů můžeme považovat za kompozitní materiál, protože se vyrábí mísením složek.

Kompozitní materiály mají vyztužovací fáze, které jsou různých rozměrů. Největší význam mají *mikrokompozitní* materiály. Jeho příčné rozměry výztuže jsou 10^0 až 10^2 μm . Tyto *mikrokompozitní* materiály mají menší hustotu a dosahují velké měrné pevnosti oproti kovům. Dále jsou *makrokompozity* jejichž velikost příčného rozměru výztuže je 10^0 až 10^2 mm. Jejich využití lze nalézt ve stavebnictví. Poslední jsou *nanokompozity* jejichž příčné rozměry výztuže jsou v jednotkách nm. [36].

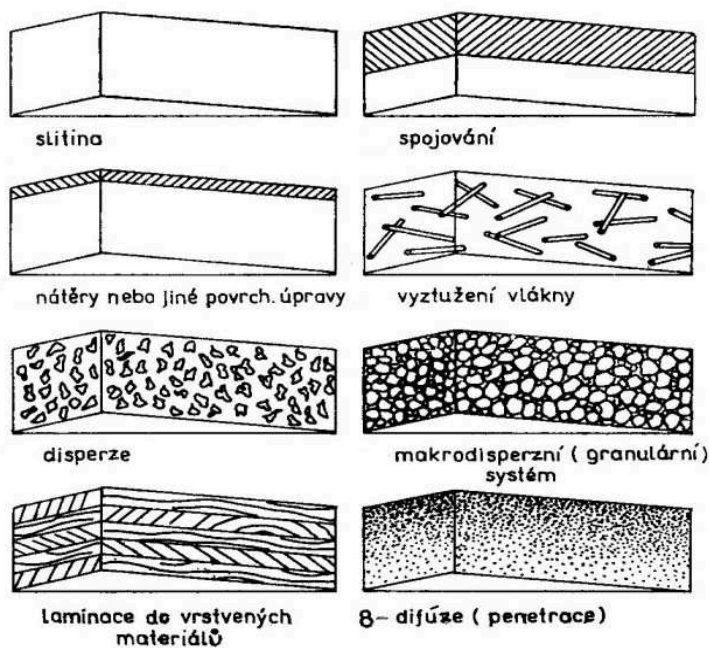
4.2.1 Dělení kompozitních materiálů podle tvaru výztuže

Částicové kompozity

Struktura částicových kompozitu je tvořena maticí zpevněnou jemnými částicemi (kovy, kysličníky kovů, konstrukční keramika) menšími než $1\text{ }\mu\text{m}$. Při konstrukci částicových kompozitů se musí dodržovat podmínky minimálního rozdílu koeficientu teplotní roztažnosti obou složek. Ta by neměla přesahovat $4 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$. Pokud se tato podmínka nedodrží, tak dojde při zvýšení teploty k vnitřnímu pnutí, které redukuje pevnost materiálů. Pryže patří mezi hlavní částicové kompozity na bázi plastů. Ke zvýšení modulu pružnosti a zvýšení tuhosti dosáhneme plněním plastů jemnými částicemi keramické nebo kovové povahy.[37].

Vláknité kompozity

„Dle délky vláken je lze rozdělit do dvou skupin – materiály vyztužené krátkými vlákny tzv. krátkovláknové (poměr délka/průměr $L/D < 100$) a materiály vyztužené dlouhými vlákny tzv. dlouhovláknové ($L/D > 100$ tj. vlákna s délkou rovnou rozměrům celého dílce)“. [38]



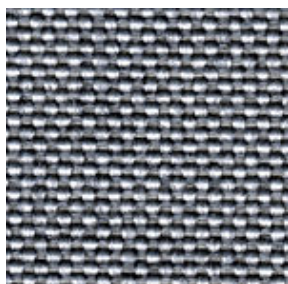
Obr. 4.1 Způsoby vytvoření kompozitu

4.2.2 Dělení kompozitních materiálů podle typu vláken

Pro kompozity používáme tyto nejznámější typy vláken: skelné, uhlíkové a aramidové.

Skelná vlákna

Hlavní výhodou skelného vlákna je odolnost proti ohni a mnoha chemikáliím. Má nízký modul pružnosti a vysokou pevnost v tahu. Nevýhodou je nízká pevnost v oděru a při vlhkosti se snižuje pevnost jednotlivých vláken. Hustota skelného vlákna se pohybuje kolem 2500 kg/m^3 , taje až při $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ a dlouhodobě snáší teploty až $450 \text{ }^\circ\text{C}$. Ze skleněných vláken můžeme vyrobit například izolace proti žáru.



Obr. 4.2 Tkanina v plátnové vazbě



Obr. 4.3 Skelné vlákno

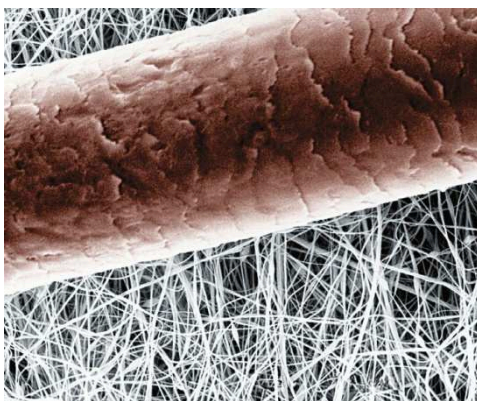
Uhlíková vlákna (karbonové vlákno)

Uhlíkové vlákno je složeno z atomů uhlíku, které jsou spojeny dohromady v mikroskopické krystaly. Nejčastěji se používají jako výztuže kompozitních materiálů. Tento tenký pramen má průměr $5\text{--}8 \text{ }\mu\text{m}$. *Prekurzor* je surovina, která se používá při výrobě uhlíkových vláken. Polyakrylonitrilová vlákna (PAN) představují v 90 % materiál pro výrobu uhlíkových vláken. Viskózoová vlákna nebo smol dehet, jako odpadní látka z krakování ropy, pokrývají zbylých 10 % materiálů pro výrobu tohoto typu vláken. Při zahřátí na $1000\text{--}2000 \text{ }^\circ\text{C}$ a při karbonizaci získá uhlíkové vlákno nejvyšší pevnost v tahu a to okolo 5650 MPa a korozní odolnost.

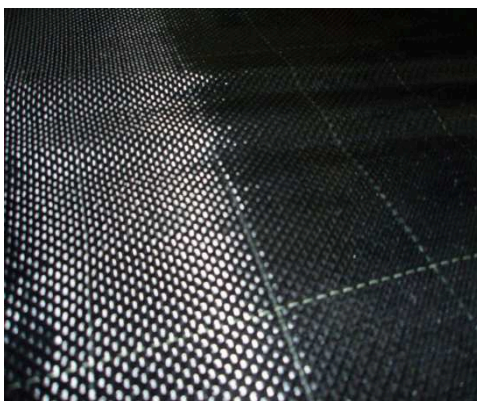
Uhlíková vlákna mají velice dobré vlastnosti. Odolávají plamenům při požáru. Dají se velice dobře zpracovávat, proto se hodí pro výrobu složitých celků, jako je například nosná skříň. Pokud

se dodržují veškerá pravidla při výrobě karbonových (uhlíkových) vláken získávají také vysokou houževnatost a spolehlivost. Mezi významné mechanické vlastnosti patří jeho tvrdost. Uhlíková vlákna se vyznačují také nízkou hmotností. [39].

U letadel se používají většinou na křídlech a trupu letadla. Cena těchto vláken na začátku tohoto tisíciletí je v letectví vyšší oproti ostatnímu průmyslu v průměru cca 40 amerických dolarů za kilogram. V nejbližší době se předpokládá snížení ceny za kilogram v průměru 15-30 amerických dolarů za kilogram. Vyšší cena je z důvodu vyššího obsahu uhlíku a větší pevností než tomu je například v automobilovém průmyslu. Zde je obsah uhlíku nižší než v letectví.[40].



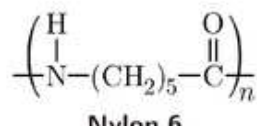
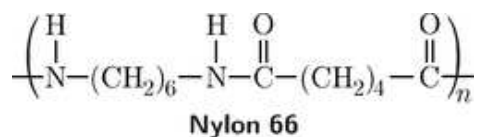
Obr. 4.4 Uhlíkové vlákno



Obr. 4.5 Nanovlákno

Aramidová vlákna

V tomto typu vlákna z lineárních makromolekul, v jejichž řetězcích se opakují funkční amidové skupiny (Karbonylová skupina)

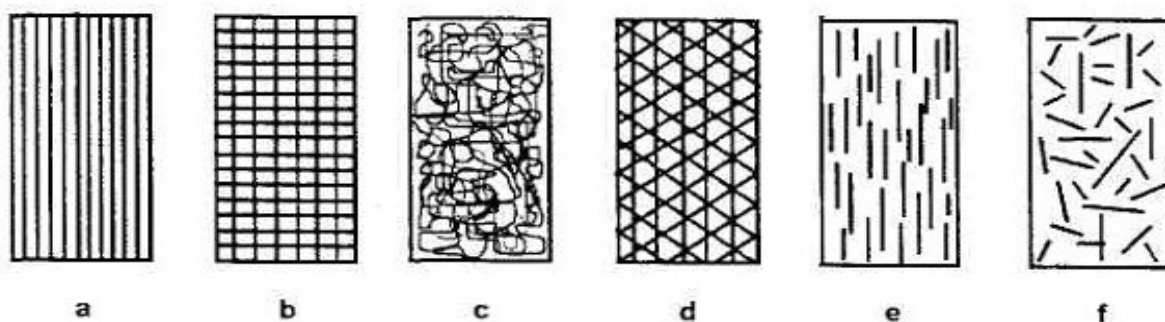


Obr. 4.6 Chemická struktura polyamidových vláken

Aramid velice dobře odolává vysokým teplotám. Bod tání má přes 400 °C. Tyto vlákna se vyznačují vysokou pevností v tahu při nízké specifické hmotnosti. *Nomex* je nejvyužívanější značka tohoto typu vlákna. [41].



Obr. 4.7 Aramidové vlákno



Obr. 4.8 Jednovrstvý kompozit s kontinuálními vlákny

Výhody a nevýhody kompozitních materiálů v letectví:

Mezi hlavní *výhody* kompozitu patří nižší výrobní náklady jak v primárních a sekundárních leteckých konstrukcích, tak i v interiérových aplikacích jako jsou schránky pro zavazadla, podlaha kabiny, interiérové panely, ale i přepážky, dveře, vnější části, jako jsou například náběžné hrany křídla. Menší hmotnost a propustnost hluku, lepší tepelné vlastnosti, vyšší pevnost, tuhost, houževnatost, rázová a požární odolnost patří mezi žádané kvality

kompozitu. Díky nim, je snadnější přeprava, rychlá montáž a demontáž součástí. Oproti lehkým slitinám mají skvělou ohnivzdornost, ovšem v případě požáru mohou být výpary toxické, což může být nebezpečné pro cestující v letadle. Kompozitní materiály jsou v těch nejagresivnějších podmínkách odolné vůči korozi a UV záření. Také mají výborné elektricky izolační i tlumivé vlastnosti. Výrazněji se nedeformují, protože jejich mez elasticity dopovídá mezi pevností.

Nevýhodou kompozitních materiálů je jeho citlivost na ředidla. Chemikálie, které se používají ve strojích typu vazelína, oleje, ropa či rozpouštědla kompozity nepoškozují. Délka životnosti závisí na vlhkosti a teplotě. [42].

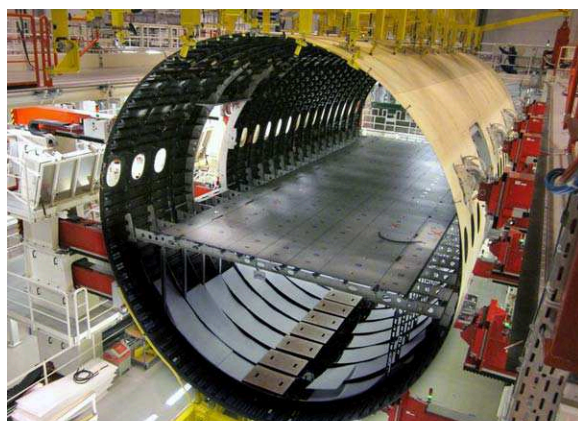
Airbus Industrie je firma, která začala jako první využívat kompozitních materiálů v letadlech. První letadlo, ve kterém byly kompozity použity je *Airbus A310-600*, který vlastní vertikální stabilizátor, který je složen pouze z uhlíkových vláken. Od té doby se zvyšoval počet kompozitních součástí v každém novém letadle od brzd na kolech až po trup letadla. Firma *Airbus Industrie* se dále zaměřuje na vylepšení techniky pro nýtování nýty, které jsou velmi těžké kvůli tloušťce spojovaných vrstev. Díky použití kompozitních materiálů, se podařilo snížit průměrná hmotnost u *Airbusu A320* o dvě tuny. Hlavním důvodem použití kompozitních materiálů je celkové snižování hmotnosti letadla a využití nových a lehčích materiálů.

Jako „Produkt tisíciletí“ označila britská vláda křídlo *Airbusu A340-500/600*, které je vyráběno pomocí nového nízkonapěťového elektromagnetického nýtovacího zařízení, a montována novým laserem. [43].

Airbus A350 XWB

Firma *Airbus Industrie* bude konkurovat *Boeingu 787 Dreamliner* novými letadly *A350 XWB* („Xtra Wide Body“) pro 270 (*Airbus 350-800*), 314 (*Airbus 350-900*) a 350 (*Airbus 350-1000*) pasažérů

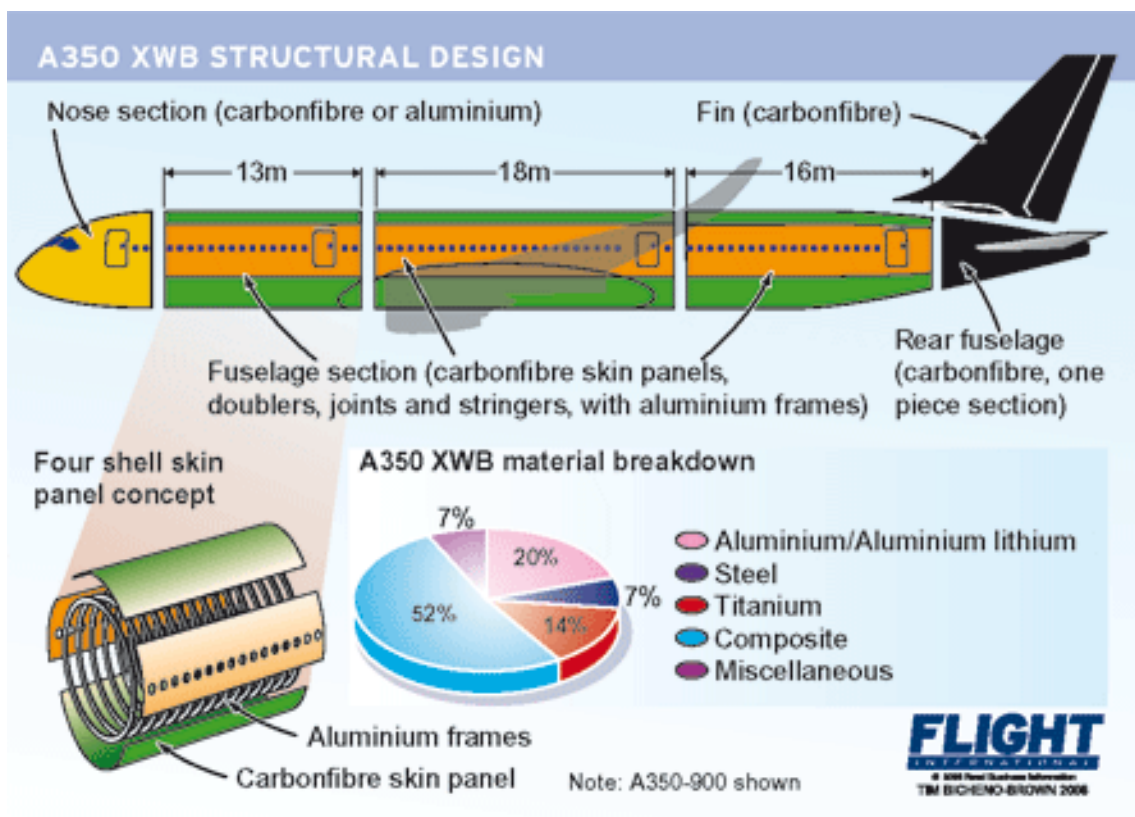
Airbus A350 XWB bude z 52 % (hmotnostních) kompozitní. *Prepregy* pro potah trupu bude dodávat společnost *Hexcel* ze svých závodů v USA, Velké Británii, Francii, Španělsku a Německu. Firma *Roll - Royce* dodá proudové motory. Do provozu bude *Airbus A350 XWB* uvedeno v roce 2013.



Obr. 4.9 Trup Airbus XWB



Obr. 4.10 Kompozitní část křídla Airbus XWB



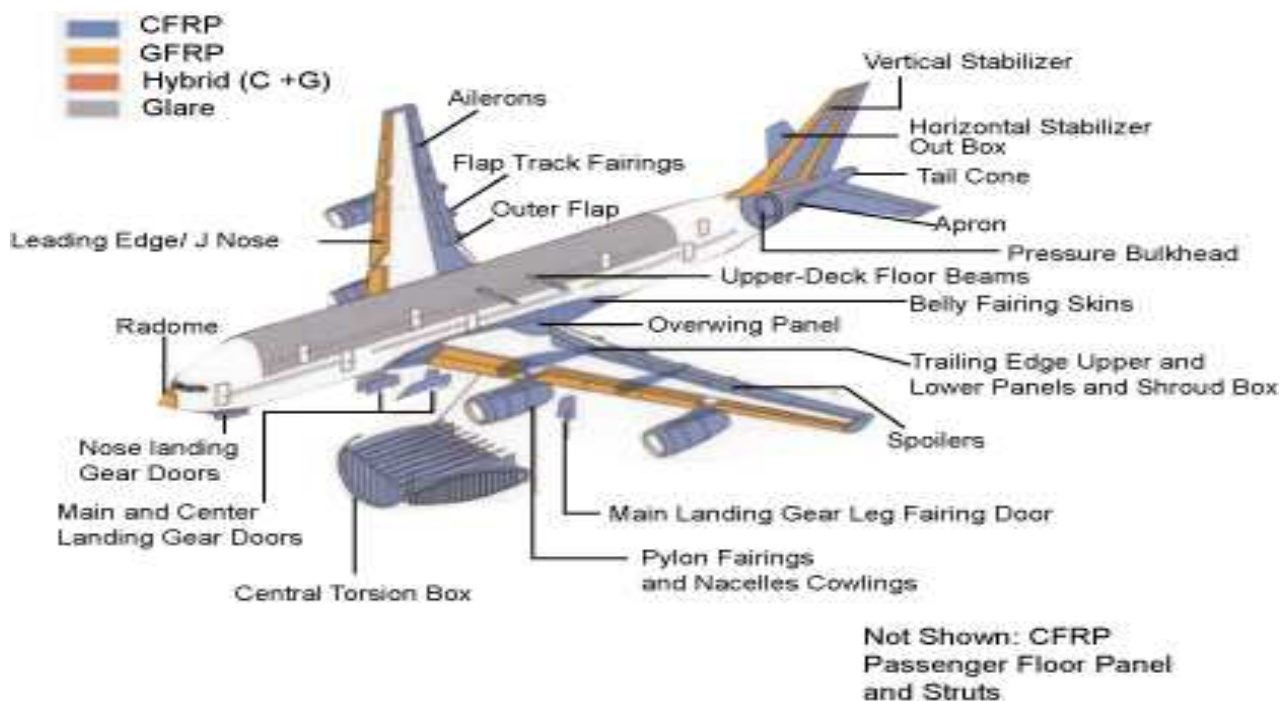
Obr. 4.11 Dopravní letadlo Airbus XWB

Kompozitní materiály na letounech

U Boeingu 737 a 747 se využití kompozitních materiálů za poslední tři dekády vyvíjelo 5 % na strukturální hmotnosti.

U Airbusu A320 17 % kompozitů a 66 % slitin hliníku.

V případě Airbus A380 je zastoupen kompozit z uhlíkových vláken v 22 % a kompozit „Glare“ (sklolaminátové vrstvy proložené vrstvami hliníkovými fóliemi) v 3 %.



Obr. 4.12 Airbus A380

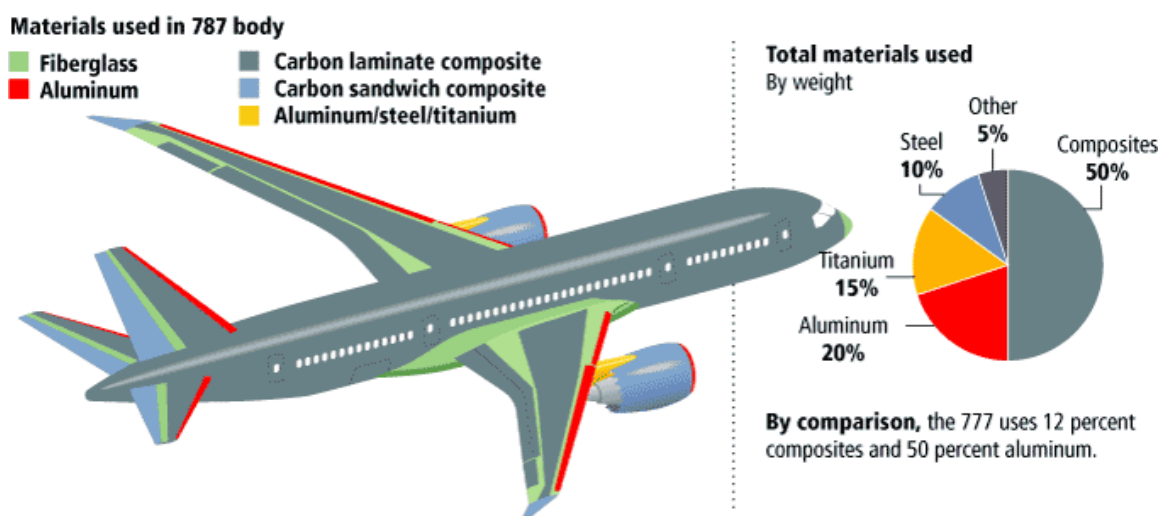
V draku Boeingu 787 Dreamliner se využívá 50 % kompozitů. [44].



Obr. 4.13 Boeing 787 Dreamliner



Obr. 4.14 Křídla Dreamliner jsou kompletně vyrobeny z kompozitních materiálů



Obr. 4.15 Materiály používané na Boeing 787 Dreamliner

4.3 Plasty (umělé hmoty)

Plastové komponenty z velké části nahrazují různé kovové výrobky pro konstrukci letadel díky své lehké hmotnosti. Plasty mohou obsahovat látky, které vylepší jejich vlastnosti například pružnost, stárnutí anebo zvýšení jejich houževnatostí. Plasty mají dobrou plasticitu, takže se dají velmi dobře tvarovat. Plastické hmoty jsou tepelně odolné, pružné a tvrdé. Mohou se velmi dobře zpracovat, proto se nemusí používat náročné technologie. Další z výhod je dobrá stabilita. Díky tomu dochází ke snížení celkové hmotnosti dopravního letadla a také k snížení výrobních nákladů.

V praxi se používají syntetické plasty.

Reaktoplast je hmota, kterou můžeme působením katalyzátoru, zářením nebo teplem vytvrdit. To znamená vytvoření prostorové sítě materiálu. Díky nim může získat skvělé vlastnosti například nerozpustnost. Zde patří epoxidové pryskyřice, které mají velmi dobré

chemické vlastnosti. Jsou odolné proti povětrnostním vlivům. Dají se použít také jako izolanty. Fenolytické pryskyřice jsou velmi odolné vůči vysokým teplotám do 120 °C. Mohou se z nich vyrábět skelné lamináty. Polyesterové skelné lamináty se používají jako pracující potah a na karoserie. [45].

Termoplasty při zahřívání měknou, ovšem chemicky se přitom nemění. Jaká je přesná teplota tání nelze určit, protože se polymer skládá z makromolekul různé délky. Mezi termoplasty patří *polyamid*, který je odolný vůči opotřebení a dobře tlumí chvění. Ovšem není odolný vůči kyselinám. Z polyamidu se vyrábí například ozubená kola. *Polystyrén* je velmi lehký materiál, který má velice dobré izolační vlastnosti. Je jeden z nejrozšířenějších plastů. Velmi dobře se zpracovává, je tvrdý a křehký. *Polyetylén* je odolný vůči kyselinám a použitelný do teploty kolem 80 °C. Je odolný vůči opotřebení. Má izolační vlastnosti. *Polyvinylchlorid* nazývaný taky jako PVC je nejvyužívanějším plastem. Tato umělá hmota se dá dobře zpracovat, má chemickou i tepelnou odolnost. Dnes nahrazuje ve velké míře beton, dřevo či textilní materiály. [1].

4.4 Kevlar

Kevlar se používá tam, kde je potřeba velmi dobrých vlastností. U letadel při výrobě brzd, podvozků a při výrobě kabelů. Kevlar se nejdříve využívá jako náhrada ocelových vláken v pneumatikách a nyní se používá v kompozitních konstrukcích. Vlákná patří mezi nylony, ovšem mají o hodně lepší vlastnosti. Mají větší pevnost, stabilitu, pružnost a malou hmotnost. Kevlar dostal přednost před skleněným vláknem a stal se hlavním článkem kompozitních letadlových konstrukcí. Výroba kevlaru je drahá, protože se těžce spojuje s použitím koncentrované kyseliny sírové. Ta se používá pro zadržování vody.

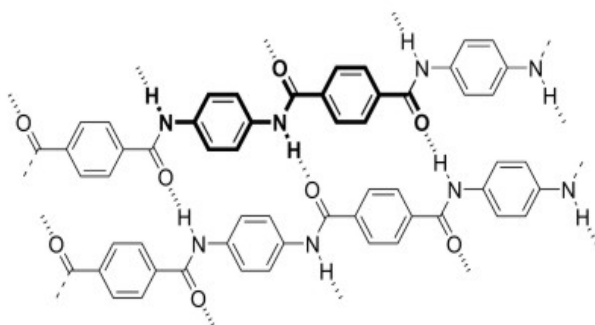
Aramidová vlákna se vyznačují dobrou odolností vůči vysokým i nízkým teplotám. Při teplotě okolo 400 °C vlákna zuhelnatí. Používají se díky své vysoké pevnosti a odolnosti vůči chemikáliím. Charakteristické vlastnosti kevlaru: jsou relativní hustota 1,44 g/cm³, pevnost v tahu kolem 3000 MPa. Mezi špatné vlastnosti kevlaru patří malá odolnost vůči vlhkosti a ultrafialovému záření.

Kevlar 49 se používá díky své pevnosti pro zpevnění trupů letadel a na ochranu optických kabelů.

Kevlar 119 se používá při výrobě pneumatik a hadic, protože má vyšší tažnost a pružnost.[46].



Obr. 4.16 Kevlar



Obr. 4.17 Chemická struktura kevlaru

Srovnání uhlíkového vlákna a kevlaru

Mezi hlavní výhody těchto dvou kompozitních materiálů patří, že jsou lehké a pevné. Používají se v extrémních podmínkách, tedy skvělá možnost využití v leteckém průmyslu či kosmickém průmyslu. Kevlar i uhlíková vlákna jsou často používány společně, ovšem v některých parametrech se liší.

Uhlíkové vlákno – je to technická tkanina, která je složena z mnoha tenkých grafitových vláken. Systém jeho využití tvoří struktura vláken, které jsou uloženy do formy a spojeny pomocí epoxidové pryskyřice. To zajišťuje co nejvyšší pevnost materiálu.

Řetězením umělých molekul do krystalové struktury pevného polymeru na mikroskopické úrovni vzniká kompozitní materiál *Kevlar*, který může být prostřednictvím vláken tkán nebo jako kapalina v lité podobě.

Tyto struktury jak kevlaru, tak pomocí karbonových vláken jsou odlišné. U kevlaru pokud dojde k narušení jeho struktury, a když se začne pod tlakem prohýbat, hrozí nebezpečí rychlého ohnutí. Proto se používá v místech, kde jsou potřeba pevné a tuhé prvky. Oproti tomu uhlíkové vlákno je pružné v závislosti na tloušťce použité vrstvy. Díky pružnosti se dá

rozptýlit energie nárazu, což se využívá u dílu, jako jsou části karoserie. Uhlíkové vlákno je ovšem méně odolné vůči silám průniku a tlaku. Je to způsobeno tím, že má takzvanou „lanovou“ konstrukci. Uhlíkové vlákno má ale jiné přednosti například je velice odolné vůči vysokým teplotám, které dovedou oslabit kevlar.

Nízká hmotnost uhlíkových vláken je jejich nespornou předností a díky technologickému postupu je možno vyrábět vlákna velmi tenká, pokud konstrukční předpoklady nepočítají s variantou o větší síle, kdy bude zapotřebí vlákna většího průměru. Díky tomu se tyto materiály staly velice oblíbené jak v automobilovém tak v leteckém průmyslu. Pokud je třeba jejich odolnost ještě zvýšit, doplní se kevlarová vrstva do karbonové struktury, což se využívá například v kosmickém průmyslu při výrobě ochranných přileb.[47].

Vlákno	Obchodní značka	Specifická hmotnost g/ccm	Tažná pevnost cN/dtex	Tažnost %
m-aramid	Nomex	1,38	4,7	22
p-aramid	Kevlar	1,44	19	2,4
Uhlíkové vlákno	T1000G	1,81	20	1,5
Polyesterové vlákno	Trevira	1,38	8	25

Tab. 4.4 Porovnání vlastností kevlaru s dalšími materiály

4.5 Ostatní nové materiály používané v leteckém průmyslu

SABIC Innovative Plastics je společnost, která se zabývá vývojem nových plastů pro letectví, které by nahradily kovy nebo jiné tradiční materiály. Letadlo při přepravě jednoho kilogramu materiálu či zavazadel na palubě spotřebuje zhruba 0,03 l paliva. Při snížení jednoho kilogramu z celkové hmotnosti letadla, ušetří letecké společnosti 1700 t paliva za rok a podílí se na snižování vypouštění CO₂ do ovzduší a to o 5400 t za rok.

Při výrobě rámců na sedačkách v letadle se začal používat plast *Lexan F6000*, který dokáže ušetřit na každém sedadle 23% hmotnosti. V letadle se 190 sedačkami se ušetří celých 80 kg, což je dost velká úspora pro aerolinie. Plast Lexan F6000 nahradil dosud používané PVC.



Obr. 4.18 Sedadla v business třídě

Lexan XHR je plast, který je oproti PVC/polymetr-methakrylátu o 12 % lehčí, což se projeví ve spotřebě paliva. Díky tomu, že je extrémně tepelně odolný používá se na dveřní kryty, sedačky, lišty okenních rámečků a další interiér. Konstrukteři dosáhli cíle snížit hmotnost sedadla o 9 kg. Tyto sedačky jsou vyráběné pro leteckou společnost Caribbean Airlines, a navrhované italským designérem Giugiaro. Mezi hlavní přednosti tohoto plastu patří jeho vlastnosti, protože *Lexan XHR* totiž splňuje velmi přísné požadavky v souvislosti s plameny, kouřem a uvolňováním tepla.



Obr. 4.19 Lišta okenních rámečků

Composite Aerospace Board (CAB) je kompozitní plastový materiál *Ultem*, který nahrazuje termosetový kompozit s voštinovou strukturou. Tento plast je vyráběný společností Crane a splňuje požadavky amerického úřadu pro letectví (FAA). Mezi jeho hlavní výhody patří 100% recyklovatelnost a lehká tepelná tvárnost. Pryskyřice *Ultem* od firmy SABIC Innovative Plastics, se vyznačuje velmi dobrými vlastnostmi jako je jeho velká tuhost, což umožňuje výrobu tenkostěnných výlisků, které nahrazují prvky z tlakově litého hliníku. Je plněn ze 40 % uhlíkem. Díky tomu se zvýší o 40 % pevnost a sníží se o 50 % hmotnost.

Dalším materiálem je průhledný plast *Lexan F2000A*, který může nahradit skla na oknech letadla a všude tam, kde je třeba rozptýlit světlo. Je velmi odolný proti nárazu.

Lexan FST je dalším průhledným plastem. Jedná se o kopolymerovou pryskyřici, která v kombinaci s Lexan XHR může dosahovat barevných efektů. Snížily by se náklady na dodatečné barvení.

„Termoplastový polyamid (TPI) Extrem UP je extrémně tepelně odolný a nehořlavý materiál. Má parametr s označením Relativní teplotní index (RTI) o hodnotě 240 °C. Jeho výrobce garantuje udržení si jeho elektrických a mechanických vlastností při této teplotě po dobu 10 let“.[48].

Hi-tech materiály se používají u prvků v místech s extrémně tvrdými podmínkami jako Ultem, který odolává ultrafialovému záření jako u servírovacích vozíků, které byly zbaveny několika kilogramů díky použití plastu Noryl. Ultem nahradil kovy u mnoha prvků v letadle. Například byl použit u varné konvice, dveří vozíků či mikrovlnné trouby. [48].

Firma *Industrie*, ve spolupráci s *3M*, vynalézá způsob jak zlepšit obtékání vzduchu kolem trupu letadla a tím redukovat tření. Vynalezla lehký film, který se potahuje trup letounu. *Film, jehož textura je podobná žraločí kůži, se nazývá „riblets“ díky tisícům malých rýh, které zachytí tok vzduchu pravidelněji a méně turbulentním způsobem.*[49]. Tento film byl testován na letounu A340 od roku 1996. Snižuje spotřebu paliva o více než 1 procento a odolává tvrdým podmínkám za letu.

U Airbusu série A340-600 a A340-500 se hliník u části předních nosných hran nahradil plastem. V úseku mezi prvním pohonem a trupem o délce 5,5 m bylo zapotřebí 5 hliníkových dílů. Ty byly nahrazeny dvěma prvky z PPS – *skelný zesílený polyfenylsulfid* (sirníku polyfenylu). Díky tomu se ušetřilo 20 % na hmotnosti, odpadly časově náročné a nákladné operace nýtování a vrtání. Také se výrazně zlepšila aerodynamika. [49].

Firma Fokker Special Products je holandská firma, která vlastní továrnu, kde se prvky PPS vyrábí. Tyto výrobky se dováží s podniku Heribert Lipp v Solnohradsku. V tomto solnohradském podniku se od roku 1995 vyrábí *speciální fólie*, které dokážou odolat vysokým teplotám až do 250 °C. Tyto fólie můžeme využít také jako vnitřní izolaci v halogenových transformátorech, medicínské technice nebo při výrobě vysokovýkonných pojicích materiálů. Hlavní složkou výroby speciálních folií je technoplast *Fortron*, který je vyráběný chemickou firmou *Celanese*. Tenké folie z firmy *Lipp-Terner* se přepraví k jednomu nizozemskému zpracovateli, kde se opracovávají při vysokých teplotách a pod vysokým tlakem. Díky tomu se spojí s vyztuženým skleněným vláknem. Tyto lamináty vzniknout s označením *Cetex* a vyrobí se ve velikosti 1,2 x 3,6 m. Na konci tohoto procesu se tyto tabule tvářejí ve firmě

Fokker Speciál Industrie a dodávají se dalšímu článku ve výrobě airbusů. Tento článek je korporace *BAE-British Aerospace*. [50].

4.6 Požadavky na nové letecké materiály

V leteckém průmyslu se klade obrovský význam na kvalitní a spolehlivé materiály, které se používají při výrobě nových letadel. Bohužel z finančních důvodů se plno revolučních projektů neuskuteční pro nedostatek financí. Tyto projekty by zvýšily bezpečnosti, cestovní rychlost a hmotnost letadla. Díky snížení hmotnosti by se ušetřilo palivo, které škodí životnímu prostředí.

Současné požadavky ve vývoji nových letadel nutí konkurenční prostředí k rozsáhlým inovacím. Jedním z požadavků je snížení celkových nákladů na provoz letadla především na palivo. Také vyšší výkony, únosnost, životnosti a spolehlivost jsou hlavním důvodem proč pokračovat ve vývoji nových materiálů. Z hlediska životního prostředí nesmím opomenout i nižší ekologickou zátěž. Bez nových a zlepšených materiálů bychom nemohli dosáhnout zvýšeným požadavků pro výrobu nových letadel.[52].

„Kritéria pro výběr leteckých materiálů

- *Pevnostní*

Měrná pevnost, měrná únavová pevnost, odolnost vůči poškození, měrná tuhost.

- *Technologická*

Tvářitelnost, obrobitelnost, svařitelnost, schopnost lepení.

- *Provozní*

Odolnost vůči korozi, opravitelnost

- *Ekonomická*

Cena, provozní náklady, náklady na likvidaci. “[52].

5 Letadlo blízké budoucnosti

Světoví konstruktéři vynalezli zcela nový typ letadla, který dosud nemá obdoby. V roce 2035 by se poprvé mělo vznést letadlo nazvané *VoltAir*. Tento koncept byl poprvé představen evropským leteckým konsorciem EADS na pařížském aerosalonu. Mezi hlavní požadavky při konstrukci letadla je jeho hmotnost a dopad na životní prostředí. Již dnes známe ekologicky šetrné elektromobily nebo elektroplavidla. Ovšem dnes přišlo na řadu i elektroletadlo. Na Zemi velmi rychle ubývá ropa jako hlavní surovina pro výrobu benzínu a leteckého paliva.

Jedna z hlavních výhod tohoto elektroletadla by byla jeho šetrnost k přírodě. VoltAir by totiž neměl spalovací motory, které by vypouštěly do ovzduší škodliviny, které ničí ozónovou vrstvu v atmosféře. V přední části letadla by měly být dvě velké lithium-iontové baterie, které by byly hlavním zdrojem energie. V zadní části letadla by měly být položeny elektromotory, které by poháněly dvě koaxiální protisměrné vrtule. Tento stroj by neměl motory, jako tomu je u klasických letadel ale vrtuli, která by představovala hlavní zdroj hluku.

Díky dvěma lithium-iontovým bateriím by toto letadlo nemuselo doplňovat palivo. To by usnadnilo rychlejší odbavení na letištích a tím zkrácení celkové doby letu. Další velká výhoda elektroletounu by bylo snížení rizika vzniku požáru při případné letecké nehodě, protože by v letounu nebylo žádné letecké palivo, které by požár způsobilo. Také by se vylepšily letecké vlastnosti letounu, protože by se neměnilo vyvážení letounu, které se mění při úbytku paliva v nádržích.

Toto letadlo by bylo využíváno na krátké tratě a odbavila by zhruba 50 – 70 cestujících.

Tento aeroplán může být realizován až v době, kdy bude ukončen vývoj vysokoteplotních supravodivých materiálů, které jsou zatím v samém začátku vývoje. Bohužel jejich využití je zatím v nedohlednu.[51].



Obr. 5.1 Elektroletoun VoltAir

Zhodnocení cíle

Cílem této práce bylo analyzovat důvody, proč se ustupuje od používaných materiálů minulého století. Byl proveden průzkum materiálů, se kterými konstruktéři letadel počítají při zavádění nových letadel do výroby. Porovnal jsem odlišnosti materiálů používající se v minulém století a nové materiály, které se zavádějí do výroby v třetím tisíciletí. Dále jsem vyjádřil, jaké požadavky budou muset splňovat materiály pro výrobu nových letadel.

Posledním cílem bylo vyjádřit, jaké materiály bych zvolil pro výrobu nových letadel a proč. Staly se jim kompozitní materiály. Právě kompozitní materiály bych nejvíce uplatnil při výrobě letadel, protože se vyznačují velmi malou hmotností oproti ocelovým součástem. Dále jsou velmi spolehlivé, stabilní a výrazně se nedeformují. Jsou také ohnivzdorné. Ovšem nevýhodou jsou výpary, které mohou být toxické.

Závěr

V dnešní době, kdy se snažíme eliminovat množství škodlivých látek v ovzduší, se konstruktéři nových letadel rozhlíží po nových lehkých materiálech, které by snížili hmotnost letadel, a tím spotřebovaly méně paliva. Tato strategie je velice důležitá pro letecké společnosti, které by ušetřily nemalé finanční prostředky při nákupu paliva.

Jedním z lehkých kovů je hořčík, který je velice lehký, ovšem má malou odolnost vůči korozi a pevnost. Vylepšení jeho vlastností jsou slitiny s jinými prvky, jako je mangan, hliník či zinek. Od počátku devadesátých let jde ovšem do popředí nového zájmu. Možnost využití hořčíku jsou kompozitní materiály, kdy by se jejich základní látka vyztužila právě hořčíkem. Právě kompozitní materiály bych nejvíce uplatnil při výrobě letadel, protože se vyznačují velmi malou hmotností.

Můj největší vzor je Boeing 787 Dreamliner, který je z 50 % složen z kompozitních materiálů a polymerů vyztužený uhlíkovými vlákny, díky čemuž je o více jak 18 000 kg lehčí než ostatní podobné dopravní letadla. Vyznačuje se také tím, že má velmi nízkou spotřebu paliva. Oproti ostatním podobně velkým strojům je spotřeba nižší o 20 %. Tím se leteckým společnostem ušetří peníze, které se mohou využít na další vývoj lehkých materiálů. Letadlo Dreamliner má také o 30 % větší okna než stejně velká dopravní letadla. Jeho rozměry na výšku jsou 48 centimetrů. Tento letoun by měl být příkladem pro celý letecký průmysl.

Neustále bude existovat důvod proč využít leteckou dopravu pro obchodní nebo turistické účely. Hlavní výhoda je rychlost a pohodlí cestujících. Doufejme, že letecká doprava bude i v budoucnosti nejbezpečnějším způsobem dopravy na planetě.

Seznam použité literatury

- [1] BEŇO, L. *Materiály a základní strojní součásti: Učební texty dle předpisu JAR-66*, 1. vydání, Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2004. ISBN 80-7204-352-8.
- [2] BENDER, L. *Stručná dětská encyklopedie vědy a techniky*, 1. vydání, Bratislava: INA, spol. s.r.o., 1996, ISBN 80-85680-82-3.
- [3] <http://www.boskowan.com/www/jirka/wright/wright.htm>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [4] <http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/construction.php>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [5] http://www.cojeco.cz/index.php?s_term=&s_lang=2&detail=1&id_desc=23621, poslední návštěva [20.4.2012]
- [6] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Koroze>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [7] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Koroze>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [8] http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=5698&s_lang=2&title=atmosf%E9rick%E1%20koroze, poslední návštěva [20.4.2012]
- [9] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Hou%C5%BEevnatost>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [10] <http://www.prvky.com/mohsova-stupnice.html>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [11] http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf, poslední návštěva [20.4.2012]
- [12] http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf, poslední návštěva [20.4.2012]
- [13] http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf, poslední návštěva [20.4.2012]
- [14] http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf, poslední návštěva [20.4.2012]
- [15] http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf, poslední návštěva [20.4.2012]
- [16] http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf, poslední návštěva [20.4.2012]
- [17] http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf, poslední návštěva [20.4.2012]
- [18] http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf, poslední návštěva [20.4.2012]
- [19] http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf, poslední návštěva [20.4.2012]
- [20] <http://referaty-seminarky.cz/permeabilita/>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [21] http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74f8696e612061206d61676e657469736d7573h&key=444, poslední návštěva [20.4.2012]
- [22] http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74f8696e612061206d61676e657469736d7573h&key=444

- poslední návštěva [20.4.2012]
- [23] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ocel>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [24] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Litina>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [25] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlin%C3%ADk>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [26] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Ho%C5%99%C4%8D%C3%ADk>
poslední návštěva [20.4.2012]
- [27] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Titan_\(prvek\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Titan_(prvek)), poslední návštěva [20.4.2012]
- [28] <http://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9B%C4%8F>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [29] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [30] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Olovo>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [31] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Zinek>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [32] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Dural>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [33] <http://zpravy.idnes.cz/zahranicni.aspx?c=1999M270X02B>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [34] http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2011_09_678-683.pdf
poslední návštěva [20.4.2012]
- [35] [http://wmdb.mobi/cs/Elektron_\(slitina_ho%C5%99%C4%8D%C3%ADku\)](http://wmdb.mobi/cs/Elektron_(slitina_ho%C5%99%C4%8D%C3%ADku))
poslední návštěva [20.4.2012]
- [36] <http://www.volny.cz/zkorenek/historie.pdf>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [37] http://www.339.vsb.cz/nauka_o_materialu/Slide14_Kompozity.pdf
poslední návštěva [20.4.2012]
- [38] http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
poslední návštěva [20.4.2012]
- [39] http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
poslední návštěva [20.4.2012]
- [40] http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A1_vl%C3%A1kna
poslední návštěva [20.4.2012]
- [41] http://www.ateam.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
poslední návštěva [20.4.2012]
- [42] http://www.alv-cr.cz/download/SVA_2009.pdf, poslední návštěva [20.4.2012]
- [43] http://edice.cd.cz/edice/IZD/izd2000/izd14_00/letadla.pdf, poslední návštěva [20.4.2012]
- [44] <http://www.volny.cz/zkorenek/historie.pdf>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [45] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Reaktoplast>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [46] http://www.firelovers.cz/clanky2.php?pod_sekce=868&sekce=8
poslední návštěva [20.4.2012]
- [47] <http://www.techmagazin.cz/453>, poslední návštěva [20.4.2012]

- [48] <http://www.techmagazin.cz/453>, poslední návštěva [20.4.2012]
- [49] http://edice.cd.cz/edice/IZD/izd2000/izd14_00/letadla.pdf
poslední návštěva [20.4.2012]
- [50] <http://technik.ihned.cz/c1-11264480-plasty-pro-automobily-a-letadla>
poslední návštěva [20.4.2012]
- [51] http://technet.idnes.cz/letadlo-budoucnosti-bude-na-baterie-za-dvacet-let-fbg-/tec_technika.aspx?c=A110701_111703_tec_technika_pka
poslední návštěva [20.4.2012]
- [52] http://ateam.zcu.cz/download/nove%20letecke%20materialy_2011.pdf
poslední návštěva [20.4.2012]

Seznam obrázků

<i>Obr. 1.1 Wilbur Wrigh</i>	11
<i>Obr. 1.2 Dvouplošník Flyer</i>	11
<i>Obr. 1.3 Orville Wright</i>	12
<i>Obr. 1.4 Hugo Junkers</i>	12
<i>Obr. 1.5 Středoplošník J1 – Blechesel</i>	13
<i>Obr. 2.1 Tvorba oxidů při korozi oceli</i>	15
<i>Obr. 2.2 Tvorba oxidů při korozi neželezných kovů</i>	15
<i>Obr. 2.3 Rovnoměrná koroze</i>	15
<i>Obr. 2.4 Nerovnoměrná koroze</i>	16
<i>Obr. 2.5 Rychlost koroze u oceli</i>	16
<i>Obr. 2.6 NelinearitaMohsovy stupnice tvrdosti</i>	19
<i>Obr. 2.7 Zkouška tvrdosti podle Brinella</i>	20
<i>Obr. 2.8 Srovnání jednotlivých tvrdostí</i>	21
<i>Obr. 2.9 Poldi tvrdoměr</i>	22
<i>Obr. 2.10 Princip měření HRC tvrdosti</i>	22
<i>Obr. 2.11 Schéma zkoušky dle Vickerse</i>	24
<i>Obr. 2.12 Deformace vtisku</i>	24
<i>Obr. 2.13 Vzorec pro výpočet hustoty</i>	25
<i>Obr. 2.14 Magnetické indukční čáry jsou koncentrované v paramagnetické látce</i>	27
<i>Obr. 2.15 Magnetické indukční čáry jsou vytlačené z diamagnetické látky</i>	27

<i>Obr. 2.16 Hysterezní křivka</i>	28
<i>Obr. 3.1 Siemens–Martinová pec</i>	30
<i>Obr. 3.2 Odlévání</i>	32
<i>Obr. 3.3 Kování</i>	32
<i>Obr. 3.4 Válcování</i>	33
<i>Obr. 3.5 Hliníková lišta</i>	34
<i>Obr. 3.6 Hořčík</i>	34
<i>Obr. 3.7 Krystaly kovového titanu</i>	35
<i>Obr. 3.8 Plech z mědi</i>	35
<i>Obr. 3.9 Nikl</i>	35
<i>Obr. 3.10 Olovo</i>	36
<i>Obr. 3.11 Dural</i>	37
<i>Obr. 4.1 Způsoby vytvoření kompozitu</i>	43
<i>Obr. 4.2 Tkanina v plátnové vazbě</i>	44
<i>Obr. 4.3 Skelné vlákno</i>	44
<i>Obr. 4.4 Uhlíkové vlákno</i>	45
<i>Obr. 4.5 Nanovlákn</i>	45
<i>Obr. 4.6 Chemická struktura polyamidových vláken</i>	46
<i>Obr. 4.7 Aramidové vlákno</i>	46
<i>Obr. 4.8 Jednovrstvý kompozit s kontinuálními vlákny</i>	46
<i>Obr. 4.9 Trup Airbus XWB</i>	48
<i>Obr. 4.10 Kompozitní část křídla Airbus XWB</i>	48

<i>Obr. 4.11 Dopravní letadlo Airbus XWB</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 4.12 Airbus A380.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 4.13 Boeing 787 Dremliner.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 4.14 Křídla Dremliner jsou kompletně vyrobeny z kompozitních materiálů</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 4.15 Materiály používané na Boeing 787 Dreamliner.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 4.16 Kevlar</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 4.17 Chemická struktura kevlaru</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 4.18 Sedadla v business třídě</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 4.19 Lišta okenních rámečků.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 5.1 Elektroletoun VoltAir</i>	<i>57</i>

Seznam tabulek

<i>Tab. 2.1 Rozdělení atmosféry podle korozní agresivity podle normy ISO 9223</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 2.2 Mohsova stupnice tvrdosti.....</i>	<i>18</i>
<i>Tab. 2.3 Rozdělení permeability do tří základních skupin</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 2.4 Hodnoty fyzikálních veličin vybraných kovů – hustota, tepelná vodivost, tepelná kapacita, roztažnost.....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 3.1 Vlastnosti siluminu</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 4.1 Základní vlastnosti čistého hořčíku.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 4.2 Vlastnosti slitin hořčíku dle normy DIN 1717.....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4.3 Nejvýznamnější slitiny hořčíku v leteckém průmyslu</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 4.4 Porovnání vlastností kevlaru s dalšími materiály</i>	<i>53</i>

Seznam grafů

<i>Graf 2.1 Hustota vybraných materiálů a prvků.....</i>	<i>25</i>
<i>Graf 2.2 Srovnání koeficientů tepelné vodivosti.....</i>	<i>26</i>